

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.043.

李鑫, 郭文芳, 王佳乐, 等. 太行山坡地不同植物篱对表层土壤水盐分布影响研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 187-196.

Li Xin, Guo Wenfang, Wang Jiale, et al. Effects of Different Hedgerows on the Distribution of Water and Salt in the Surface Soil of Taihang Hillside[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 187-196.

# 太行山坡地不同植物篱对表层土壤水盐分布影响研究

李鑫, 郭文芳, 王佳乐, 陈艳梅, 刘倩愿, 高飞, 贺舒蕾

(河北师范大学 地理科学学院, 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024)

**摘 要:** [目的] 探究不同植物篱对太行山坡地表层土壤水盐分布影响, 为太行山坡地布设最优植物篱和减少水土流失提供理论与实践依据。[方法] 以太行山坡度 13°、海拔 152 m 正南坡地的薄荷、白芍、泽兰、艾草、锦灯笼、鱼腥草植物篱小区为研究对象, 以空白裸地小区为对照, 采集各小区植物和带上、带中、带下 0—20 cm 土壤, 比较分析植物生理特征和土壤水盐特征差异, 并采用主成分分析、聚类分析对植物篱影响土壤水盐分布能力进行综合评价。[结果] (1) 植物篱生理特征存在差异。薄荷、白芍地上、地下、总生物量较高, 锦灯笼、鱼腥草则较低; 白芍根冠比最高 ( $p < 0.05$ ); 鱼腥草、锦灯笼植物含水率较高, 白芍则最低。(2) 植物篱影响坡地土壤水盐分。与空白裸地相比, 植物篱带中、带下平均土壤容重降低了 9.23%, 7.22%; 植物篱带中平均自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量分别增加了 8.10%, 14.98%, 21.49%, 19.78%; 植物篱带下平均电导率则降低了 9.97%。(3) 植物篱类型与篱带位置对土壤水盐分布存在交叉影响, 其中植物篱类型显著影响自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、pH 和电导率 ( $p < 0.05$ ), 篱带位置显著影响电导率 ( $p < 0.05$ ), 植物类型 × 篱带位置显著影响自然含水量和电导率 ( $p < 0.05$ )。(4) 植物篱生理特征与土壤水盐相关性显著, 其地下生物量、根冠比、植物含水率与土壤水盐指标之间多呈显著或极显著相关 ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )。(5) 各植物篱对土壤水盐分布影响能力综合排序为: 白芍 > 泽兰 > 锦灯笼 > 鱼腥草 > 薄荷 > 艾草。[结论] 植物篱显著影响坡地表层土壤水盐分布, 白芍植物篱对表土水盐分布影响能力最强, 艾草植物篱则最弱, 因此防治坡地水盐流失可优选白芍植物篱, 若采取艾草植物篱则宜采取混交种植模式并合理布局。

**关键词:** 太行山坡地; 植物篱; 土壤水盐分布; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: S365

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0187-10

## Effects of Different Hedgerows on the Distribution of Water and Salt in the Surface Soil of Taihang Hillside

Li Xin, Guo Wenfang, Wang Jiale, Chen Yanmei, Liu Qianyu, Gao Fei, He Shulei

(School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Hebei Technology

Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Laboratory of

Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the effects of different hedgerows on water and salt distribution in surface soil of Taihang Mountains, and to provide theoretical and practical basis for optimal hedgerow layout and soil erosion reduction. [Methods] The hedgerow plots of *Mentha haplocalyx* Briq., *Paeonia lactiflora* Pall., *Ageratina adenophora* Spreng, *Artemisia argyi*, *Physalis alkekengi* L. and *Houttuynia cordata* Thunb in the south slope of Taihang Mountain with a slope of 13° and an altitude of 152 meters were taken as the research objects, and the blank bare land plot was taken as the control, the plant samples and 0—20 cm soil with upper, middle and lower belts in each plot were collected. The differences of plant physiological characteristics and soil water and salt characteristics were compared and analyzed. Principal

收稿日期: 2022-09-26

修回日期: 2022-10-19

资助项目: 河北省自然科学基金(D2021205006); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2021092); 河北师范大学科研基金项目(L2021B24)

第一作者: 李鑫(1996—), 男, 山东省淄博人, 在读硕士研究生, 主要从事区域生态与水土保持研究。E-mail: 740527147@qq.com

通信作者: 陈艳梅(1970—), 女, 河北省邢台人, 博士, 博士生导师, 主要从事区域生态与水土保持研究。E-mail: 330896729@qq.com

<http://stbcj.paperonce.org>

component analysis and cluster analysis were used to comprehensively evaluate the influence of hedgerows on soil water and salt distribution. [Results] (1) Differences in physiological characteristics of hedgerows were observed. The aboveground, underground and total biomass of *Mentha haplocalyx* Briq. and *Paeonia lactiflora* Pall. were higher, while those of *Physalis alkekengi* L. and *Houttuynia cordata* Thunb were lower. The root-shoot ratio of *Paeonia lactiflora* Pall. was the highest ( $p < 0.05$ ). The moisture contents of *Physalis alkekengi* L. and *Houttuynia cordata* Thunb were higher, while that of *Paeonia lactiflora* was the lowest. (2) Hedgerows affected soil water salinity on sloping land. Compared with the blank bare land, the average soil bulk density of the middle and lower hedgerows decreased by 9.23% and 7.22%. The average natural water content, saturated water capacity, capillary water capacity and field water capacity in the hedgerow increased by 8.10%, 14.98%, 21.49%, and 19.78%, respectively. The average conductivity under the hedgerow decreased by 9.97%. (3) Hedgerow type and hedgerow position had a cross effect on soil water and salt distribution. Hedgerow type significantly affected natural water content, saturated water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, soil pH and soil conductivity ( $p < 0.05$ ). Hedgerow position significantly affected soil conductivity ( $p < 0.05$ ). Plant type  $\times$  hedgerow position significantly affected natural water content and soil conductivity ( $p < 0.05$ ). (4) The physiological characteristics of hedgerows were significantly correlated with soil water and salt. There were significant or extremely significant correlations between underground biomass, root shoot ratio, plant water content and soil water and salt indexes ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ). (5) The order of influence ability of hedgerows on soil water and salt distribution was: *Paeonia lactiflora* Pall. > *Ageratina adenophora* Spreng > *Physalis alkekengi* L. > *Houttuynia cordata* Thunb > *Mentha haplocalyx* Briq. > *Artemisia argyi*. [Conclusion] Hedgerows significantly affected the distribution of water and salt in the surface soil of slope land. *Paeonia lactiflora* Pall. hedgerow had the strongest influence on the distribution of water and salt in the surface soil, while *Artemisia argyi* was the weakest. Therefore, the hedgerow of *Paeonia lactiflora* Pall. hedgerow can be preferred to prevent water and salt loss in slope land. If the hedgerow of *Artemisia argyi* is adopted, the mixed planting mode and reasonable layout should be adopted.

**Keywords:** Taihang hillside; hedgerow; soil water and salt distribution; principal component analysis; cluster analysis

土壤水分与可溶性盐分是土壤重要组成部分<sup>[1]</sup>,它供应植物生长发育所需水和养分,同时也受植物生长发育等生态过程的重要影响。作为影响陆地生态系统结构和功能的重要生态因子,土壤水盐的微小变化都在土壤—植被耦合关系中表现出来<sup>[2]</sup>。尤其是半干旱—半湿润地带的丘陵坡地,植被是影响坡地表层土壤水盐分布及变化的关键因素,植被类型、覆盖度和生长状况等均能直接或间接影响坡地土壤水分和可溶性盐分的循环流动<sup>[3]</sup>。由于特殊的自然地理环境,处于半干旱—半湿润地带的丘陵坡地生态环境脆弱敏感,在人类长期不合理开发和垦殖利用下,多数地区水土流失较为严重,部分坡地出现土壤水分亏缺、表层盐分流失等问题,亟需改善和治理<sup>[4]</sup>。

为防治坡地水盐流失等生态问题,采取相应水土保持措施具有必要性。植物篱作为一种具有调蓄土壤水分、防治土壤侵蚀、改善土壤养分等生态功能的

水土保持措施,在较多地区丘陵坡地得到广泛应用<sup>[5]</sup>。植物篱是沿坡地等高线按一定间距栽植单行或多行植物逐渐形成的植物篱笆<sup>[6]</sup>,它通过地上茎枝叶、地下细根拦截表层泥沙、径流来调蓄土壤水分和减少养分流失<sup>[7]</sup>,其布设成本经济低廉,可以形成良好经济效益和生态效益。在强降雨季,随着坡地产流雨的形成,植物篱水土保持作用逐渐凸显,当坡面径流裹挟泥沙由坡顶至坡底流动,经植物篱拦截后,篱带前通常会形成短距离回水带,使土粒沉积在篱带内部与上方形成淤积,而经篱带过滤后的径流泥沙,流速增大,动能增加,进而侵蚀篱带下方土壤,使植物篱带上、下间土壤水分、盐分及颗粒等发生变化<sup>[8]</sup>。目前,国内有关坡地植物篱的研究主要集中在华南丘陵区、西南喀斯特地貌区和西北黄土高原区等地<sup>[9-10]</sup>。黄小芳等<sup>[11]</sup>分析了紫穗槐植物篱对三峡库区坡地土壤理化性质和可蚀性影响,发现植物篱小区

内土壤细颗粒和土壤养分含量均高于无植物篱小区,表明植物篱能减少土壤侵蚀、改善土壤质地和调节土壤养分。王恒松等<sup>[12]</sup>研究了喀斯特石漠化区刺梨植物篱对坡耕地控流减沙的变化规律,发现刺梨植物篱具备保水固土减沙效益和对土壤侵蚀水动力过程的调控功能。党汉瑾等<sup>[13]</sup>通过研究黄土高原丘陵区柠条植物篱土壤水分变化,发现带状柠条植物篱带内部土壤密度、非毛管孔隙度、毛管持水量等均优于带间、带前和带后,且土壤透水保水性能更强,进而得出带状植物篱能提高带前、带内土壤水分的结论。

长期以来,许多学者在南方亚热带、西北干旱区等诸多生境的丘陵坡地配置了多种植物篱模式,并对植物篱拦截径流、贮蓄保水和调节土壤养分等生态效益进行了大量研究<sup>[14-15]</sup>。然而现有研究中,对处于北方地区半干旱—半湿润地带的太行山坡地植物篱相关研究成果较少,对植物篱与土壤水盐分布间关系的研究也较为缺乏,制约了人们对植物篱在华北山区实践应用的深入认识。因此,本研究以太行山典型坡地6种草本植物篱为研究对象,分析不同植物篱生理特征与表层土壤水盐分布关系及变化规律,并对植物篱影响坡地土壤水盐能力进行综合评价,以期对太行山坡地合理布设最优种植物篱和防治水盐流失提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北临城县绿蕾农林科技有限公司核桃基地(114°29′16″—114°30′1.4″E, 37°29′47″—37°29′2.70″N),该基地位于河北省西部、太行山东麓,属于典型丘陵坡地,坡度7°~15°,整体海拔120~180 m。该区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温12~14℃,其中1月平均气温为-2℃,7月平均气温为27℃;降水多集中在7—9月,年均降水量约605 mm。土壤类型多为棕壤和风化形成的山地褐土,土质中性偏碱,土壤沙性强,土层浅薄且易侵蚀。植被现以人工种植的核桃、苹果为主,自然植被有各类蒿属和禾本科杂草等。长期以来,由于高强度垦殖利用和人为干扰导致该区内坡地水土流失较为严重。

### 1.2 试验设计及观测方法

本研究在2022年3月初选取研究区东北部坡地为试验场地,该坡地2003年以来种植核桃后果林生长较差、产量不高,且在旱季土壤水分亏缺,强降雨季则易形成泥沙混合流,因而水土流失最为严重,亟需改善治理。据此,本试验在该坡地内选取坡度13°、坡向正南、海拔152 m的坡中位置,在核桃树行间沿

等高线平行布设7个水平投影面积为10 m×5 m的径流小区:薄荷(*Mentha haplocalyx* Briq.)植物篱小区(H<sub>1</sub>)、白芍(*Paeonia lactiflora* Pall.)植物篱小区(H<sub>2</sub>)、泽兰(*Ageratina adenophora* Spreng)植物篱小区(H<sub>3</sub>)、艾草(*Artemisia argyi*)植物篱小区(H<sub>4</sub>)、锦灯笼(*Physalis alkekengi* L.)植物篱小区(H<sub>5</sub>)、鱼腥草(*Houttuynia cordata* Thunb)植物篱小区(H<sub>6</sub>)和空白裸地小区(CK)。植物篱栽植设计为:2022年3月初在各植物篱小区中部沿等高线布设1条植物篱带,篱带呈品字形密植3行植株,每行内株间距20 cm,总体带宽为1 m,所有草本植物篱均采用移植2年生带叶生长根形式紧密种植,4月中旬开始形成篱带。径流小区气象观测主要包括降雨强度、次数及产流雨情况,通过临城气象站(站号53792)和实地监测进行降雨数据采集,根据《降水量等级》(GB/T28592-2012)<sup>[16]</sup>,24 h降雨量在10 mm以下为小雨,10.0~24.9 mm为中雨,25.0~49.9 mm为大雨,50.0~99.9 mm为暴雨。试验地在观测期间(2022年3月1日—7月30日)共观测到24场降雨事件,总降雨量约为325.8 mm,其中小雨13场、中雨5场、大雨及暴雨6场,而坡面产流雨有11场,产流雨次数增加促使坡地水土扰动频繁,影响坡地土壤水盐变化。

### 1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 于2022年7月30日—8月1日进行植物和土壤采样,采样时间为雨后3 d晴天且无人工措施干扰。植物采样:在各植物篱小区篱带内平行设置3个1 m×1 m植物样方,采用收获法采集植物根茎叶样本,用于测定地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比和植物含水率。土壤采样:在各植物篱小区3个1 m×1 m植物样方的植物篱带上(冠层投影带上±30 cm范围)、带中、植物篱带下(冠层投影带下±30 cm范围)处布设采样点,空白裸地小区在平行位置处布设采样点,共计63个采样点,除去地表覆盖物后分别用土钻和环刀采集0—10 cm、10—20 cm表层土壤,均编号密封带回实验室后进行土壤容重、自然含水量、饱和含水量、毛管持水量、田间持水量和土壤pH、电导率的测定。

1.3.2 指标测定 植物地上生物量、地下生物量、总生物量、植物含水率采用烘干称重法(70℃烘干至恒重)测定;根冠比为地下生物量/地上生物。土壤容重、自然含水量、饱和含水量、毛管持水量、田间持水量均采用环刀法测定;土壤pH采用电极电位法测定,土水比为1:2.5;土壤电导率采用电导率仪测定,土水比为1:5浸提,静置后取上层澄清液测定。



## 1.4 数据处理与统计分析

用 Excel 2010 软件对植物生理数据与土壤水盐数据预处理;用 SPSS 26.0 软件对植物篱生理特征和土壤水盐进行单因素方差分析和 LSD 法显著性检验 ( $p < 0.05$ );用双因素方差法分析植物篱类型、篱带位置对土壤水盐是否存在交互影响;用 Pearson 法对植物篱生理特征与土壤水盐分布之间相关性分析并显著性检验;用主成分分析法综合评价各植物篱对土壤水盐分布的影响能力;用欧氏距离对植物篱影响土壤水盐能力进行聚类分析<sup>[17]</sup>;用 Origin 2019 软件绘制图表。

其中,主成分分析中由于土壤水盐指标量纲不同,为排除对评价结果影响,需对原始水盐数据进行标准化处理,本研究采用“S”型函数进行标准化,“S”型函数分为升型和降型函数两种,具体公式<sup>[18]</sup>:

$$\text{升型:} \begin{cases} 0 & x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & a < x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{降型:} \begin{cases} 1 & x \leq a \\ (x-b)/(a-b) & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x$  为土壤水盐的某一指标值; $a$  和  $b$  分别为各土壤水盐指标的最小值和最大值。研究选取各小区带上、带

中、带下土壤水盐指标中,因带下土壤水盐含量在一定范围内与植物篱影响能力呈负相关,故采取降型函数,而带上、带中土壤水盐含量在一定范围内与植物篱影响能力呈正相关,因此采用升型函数标准化。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物篱生理特征

6 种植物篱生物量、根冠比和植物含水率等存在差异。由表 1 看出,地上生物量为  $H_1 > H_4 > H_3 > H_2 > H_5 > H_6$ ,其中薄荷最高,白芍、锦灯笼、鱼腥草较低,且薄荷显著高于白芍、锦灯笼、鱼腥草这 3 种植物篱 ( $p < 0.05$ )。地下生物量为  $H_2 > H_4 > H_1 > H_3 > H_5 > H_6$ ,表现出白芍地下生物量最高,且显著高于其他 5 种植物篱 ( $p < 0.05$ ),其地下生物量分别是薄荷、泽兰、艾草、锦灯笼、鱼腥草的 4.02, 11.41, 2.77, 33.96, 43.46 倍。总生物量为  $H_1 > H_2 > H_4 > H_3 > H_5 > H_6$ ,表现出薄荷最高,锦灯笼、鱼腥草较低,且薄荷显著高于锦灯笼、鱼腥草 ( $p < 0.05$ )。根冠比为  $H_2 > H_6 > H_4 > H_3 > H_5 > H_1$ ,其中白芍根冠比最高,且显著高于其他 5 种植物篱 ( $p < 0.05$ )。植物含水率为  $H_6 > H_5 > H_3 > H_4 > H_1 > H_2$ ,其中鱼腥草、锦灯笼、泽兰较高,白芍最低,并表现出鱼腥草、锦灯笼植物含水率显著高于白芍的特征 ( $p < 0.05$ )。

表 1 植物篱生理特征

Table 1 Physiological characteristics of hedgerows

| 小区编号                        | H <sub>1</sub> | H <sub>2</sub> | H <sub>3</sub> | H <sub>4</sub> | H <sub>5</sub> | H <sub>6</sub> |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 地上生物量/(kg·m <sup>-2</sup> ) | 2.34±1.48A     | 0.06±0.02B     | 0.11±0.04AB    | 0.21±0.04AB    | 0.04±0.02B     | 0.02±0.01B     |
| 地下生物量/(kg·m <sup>-2</sup> ) | 0.11±0.05B     | 0.42±0.09A     | 0.04±0.01B     | 0.15±0.03B     | 0.01±0.004B    | 0.01±0.002B    |
| 总生物量/(kg·m <sup>-2</sup> )  | 2.45±1.52A     | 0.48±0.11AB    | 0.15±0.05AB    | 0.36±0.07AB    | 0.05±0.02B     | 0.03±0.01B     |
| 根冠比                         | 0.06±0.03B     | 7.57±1.18A     | 0.41±0.11B     | 0.75±0.10B     | 0.38±0.07B     | 0.88±0.56B     |
| 植物含水率/%                     | 70.25±8.17BC   | 63.40±3.17C    | 77.58±4.78ABC  | 70.42±1.28BC   | 85.14±4.43AB   | 87.00±1.01A    |

注:表中数据为平均值±标准误,同行不同大写字母表示同一生理特征在不同植物篱小区间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

### 2.2 表层土壤水盐分布特征

各小区间、小区内部篱带间表层土壤容重存在一定差异。由表 2 看出,整体上,6 种植物篱小区的带上、带中、带下的平均土壤容重 (1.31 g/cm<sup>3</sup>, 1.30 g/cm<sup>3</sup>, 1.32 g/cm<sup>3</sup>) 相差较小;空白裸地小区在平行位置内的带中、带下土壤容重较大,而带上土壤容重最小。具体而言,H<sub>1</sub>, H<sub>5</sub> 小区土壤容重为带上>带下>带中;H<sub>2</sub>, H<sub>6</sub>, CK 小区土壤容重均为带中>带下>带上;H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub> 小区土壤容重分别呈带下>带上>带中、带中>带上>带下的特征。植物篱与空白裸地对比发现,H<sub>1</sub>—H<sub>6</sub> 小区带中、带下的土壤容重明显低于 CK 小区,H<sub>1</sub>—H<sub>6</sub> 带中分别比 CK 带中低 16.39%, 12.70%, 7.58%, 2.16%, 13.60%, 4.41%, H<sub>1</sub>—H<sub>6</sub> 带下分别比 CK 带下低 7.63%, 12.80%, 1.44%, 8.46%, 8.46%,

5.22%。CK 小区土壤容重表现出带中>带下>带上,带中、带下比带上高 5.97%, 5.22%, 可见空白裸地小区土壤容重存在向下坡位增大趋势。

各小区间、小区内部篱带间表层土壤水分分布存在差异。自然含水量方面,H<sub>1</sub>, H<sub>4</sub>, H<sub>5</sub>, H<sub>6</sub>, CK 均为带下>带上>带中,H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub> 则分别为带上>带中>带下、带中>带上>带下,其中植物篱小区带下平均自然含水量比带上、带中高 1.65%, 10.31%, CK 小区带下分别比带上、带中高 23.87%, 31.84%, 可见植物篱带间差异相对较小,CK 差异相对较大,且 CK 带下显著高于带上、带中 ( $p < 0.05$ ),而植物篱中只 H<sub>1</sub>, H<sub>4</sub>, H<sub>6</sub> 带下显著高于带上、带中 ( $p < 0.05$ ),H<sub>2</sub> 则为带上显著高于带下 ( $p < 0.05$ )。饱和持水量方面,H<sub>1</sub>, H<sub>5</sub> 为带中>带下>带上,H<sub>2</sub>, H<sub>6</sub>, CK 为带上>带

下>带中,H<sub>3</sub>,H<sub>4</sub>分别为带中>带上>带下、带下>带上>带中,可见植物篱小区带中饱和持水量较高,CK 则较低,各植物篱小区带中平均饱和持水量是 CK 的 1.18 倍,且 H<sub>1</sub>的带中饱和持水量均显著高于带上( $p<0.05$ ),CK 带间则无显著性差异。毛管持水量方面,各植物篱小区平均毛管持水量为带中>带下>带上,而 CK 则为带下>带上>带中,H<sub>1</sub>—H<sub>6</sub>小区的带中毛管持水量分别比CK 带中高 36.33%,46.82%,11.18%,12.82%,

32.41%,24.69%,可见植物篱小区篱带中毛管持水量比空白裸地小区同坡位高。田间持水量方面,H<sub>1</sub>和 H<sub>5</sub>田间持水量为带中>带下>带上、H<sub>3</sub>为带中>带上>带下,H<sub>4</sub>,CK 为带下>带上>带中,H<sub>2</sub>,H<sub>6</sub>为带上>带中>带下、带上>带下>带中,整体上植物篱带上、带中平均田间持水量分别比 CK 带上、带中高 18.87%,24.66%,且 H<sub>1</sub>带中显著高于带上、带下( $p<0.05$ ),CK 带间则无显著性差异。

表 2 土壤容重及水分分布特征

Table 2 Characteristics of soil bulk density and water distribution

| 小区编号           | 篱带位置 | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 自然<br>含水量/%   | 饱和<br>持水量/%   | 毛管<br>持水量/%     | 田间<br>持水量/%     |
|----------------|------|------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| H <sub>1</sub> | 带上   | 1.38±0.03Aa                  | 14.35±0.76ABb | 30.11±1.54Bb  | 25.96±1.12Bb    | 21.78±1.08Bb    |
|                | 带中   | 1.22±0.05Ab                  | 12.41±1.03Bc  | 39.87±2.16Aa  | 33.40±2.34Aab   | 26.89±2.03Aabc  |
|                | 带下   | 1.31±0.06Aa                  | 15.41±0.72Ab  | 35.79±2.17ABa | 30.43±1.05ABabc | 24.91±0.95ABabc |
| H <sub>2</sub> | 带上   | 1.18±0.03Aa                  | 24.68±1.18Aa  | 44.24±2.53Aa  | 40.81±2.40Aa    | 36.04±2.49Aa    |
|                | 带中   | 1.26±0.06Aab                 | 22.13±0.81ABa | 38.61±2.74Aa  | 35.97±2.11Aa    | 30.98±2.36Aa    |
|                | 带下   | 1.25±0.04Aa                  | 21.56±0.25Ba  | 38.69±2.33Aa  | 35.22±1.79Aa    | 30.16±1.80Aa    |
| H <sub>3</sub> | 带上   | 1.34±0.08Aa                  | 17.67±1.59Ab  | 33.19±4.10Ab  | 26.12±3.16Ab    | 20.95±2.44Ab    |
|                | 带中   | 1.32±0.05Aab                 | 18.62±1.31Aab | 33.64±1.78Aab | 27.24±1.41Acd   | 22.54±1.26Abc   |
|                | 带下   | 1.39±0.09Aa                  | 15.87±0.92Ab  | 31.77±3.62Aa  | 25.05±1.57Ac    | 20.85±1.45Ac    |
| H <sub>4</sub> | 带上   | 1.37±0.04Aa                  | 17.58±1.05ABb | 31.71±1.29Ab  | 28.40±1.24Ab    | 23.85±1.00Ab    |
|                | 带中   | 1.39±0.06Aab                 | 15.82±1.03Bbc | 31.09±2.59Ab  | 27.64±1.60Abcd  | 23.12±1.78Abc   |
|                | 带下   | 1.30±0.04Aa                  | 18.96±0.36Aa  | 35.73±2.29Aa  | 33.53±2.24Aab   | 27.83±2.02Aab   |
| H <sub>5</sub> | 带上   | 1.32±0.10Aa                  | 18.57±2.02Ab  | 33.94±4.31Aab | 31.22±4.27Ab    | 23.90±2.14Ab    |
|                | 带中   | 1.25±0.02Ab                  | 16.23±2.16Abc | 36.50±0.89Aab | 32.44±1.41Aabc  | 26.37±1.59Aab   |
|                | 带下   | 1.30±0.06Aa                  | 19.07±0.58Aa  | 36.01±2.90Aa  | 31.13±1.10Aab   | 26.30±1.46Aabc  |
| H <sub>6</sub> | 带上   | 1.26±0.06Aa                  | 16.19±1.27Bb  | 35.85±1.49Aab | 30.59±1.87Ab    | 25.33±1.64Ab    |
|                | 带中   | 1.36±0.04Aab                 | 15.27±0.63Bbc | 32.65±2.46Aab | 30.55±1.98Aabc  | 23.96±2.07Abc   |
|                | 带下   | 1.34±0.02Aa                  | 19.97±0.52Aa  | 33.89±0.78Aa  | 31.42±0.82Aab   | 25.07±0.94Aabc  |
| CK             | 带上   | 1.34±0.07Aa                  | 16.38±1.50ABb | 33.36±3.53Ab  | 27.06±2.50Ab    | 21.29±2.12Ab    |
|                | 带中   | 1.42±0.04Aa                  | 15.39±0.61Bbc | 30.09±1.37Ab  | 24.50±0.72Ad    | 20.57±0.86Ac    |
|                | 带下   | 1.41±0.05Aa                  | 20.29±1.77Aa  | 31.25±2.08Aa  | 28.60±2.09Abc   | 24.10±2.11Abc   |

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同大写字母表示同一小区在篱带位置间差异显著( $p<0.05$ ),同列不同小写字母表示同一篱带位置在不同小区间差异显著( $p<0.05$ )。

由图 1 看出,不同小区间、小区内部表层土壤 pH、电导率分布存在明显变化。土壤 pH 方面,所有小区土壤 pH 均低于 9.00,其中 H<sub>1</sub>,H<sub>2</sub>为带下>带上>带中,H<sub>3</sub>,CK 为带中>带上>带下,H<sub>4</sub>,H<sub>5</sub>为带中>带下>带上,H<sub>6</sub>为带上>带下>带中,整体上植物篱小区带上、带中、带下平均土壤 pH 值分别比 CK 带上、带中、带下高 3.57%,3.29%,4.87%,可见植物篱与 CK 间土壤 pH 值存在变化,但相差较小。土壤电导率作为土壤物理性质之一,可以直接反映出土壤混合盐分的含量<sup>[19]</sup>。在各小区中,H<sub>1</sub>,H<sub>3</sub>,H<sub>4</sub>,H<sub>6</sub>土壤电导率均为带上>带

中>带下,H<sub>2</sub>,H<sub>5</sub>为带中>带上>带下,CK 则为带下>带上>带中,整体上各植物篱小区土壤电导率均呈现带上、带中比带下高的特征,且 H<sub>3</sub>,H<sub>4</sub>的带上均显著高于带下( $p<0.05$ )。而植物篱与 CK 对比中,所有植物篱带上、带中、带下的平均土壤电导率分别比 CK 带上、带中、带下高 4.06%,3.34%,−9.07%,可见植物篱带下土壤电导率较空白裸地有所降低。

2.3 植物篱类型与篱带位置对土壤水盐分布交叉影响

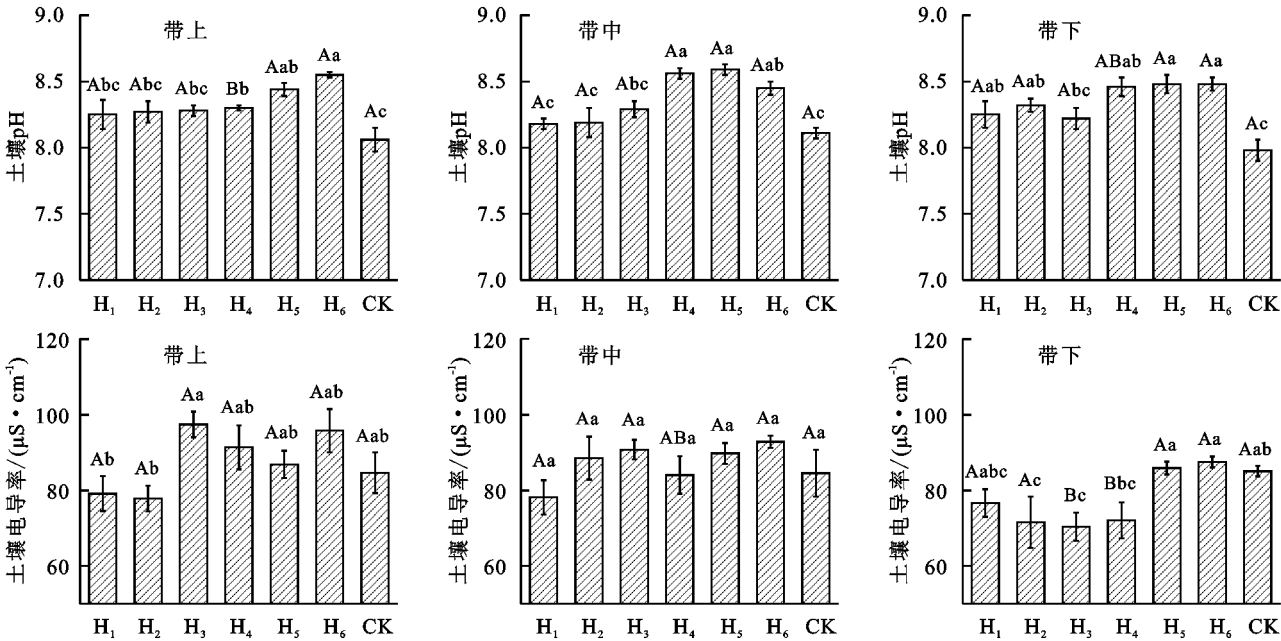
由表 3 可知,由双因素方差分析显示,植物篱类型显著影响土壤自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、

田间持水量、土壤 pH 值、土壤电导率( $p<0.05$ ),而对土壤容重无显著影响;篱带位置仅显著影响土壤电导率( $p<0.05$ ),对其余土壤水盐指标无显著影响;植物篱类型 $\times$ 篱带位置的交互作用则显著影响自然含水量、土壤电导率( $p<0.05$ ),对其余土壤水盐指标无显著影响。

2.4 植物篱生理特征与土壤水盐相关性分析

由表 4 看出,植物篱生理特征与土壤水盐之间存在显著或极显著相关关系。其中地上生物量与自然含水量呈极显著负相关关系( $p<0.01$ )。地下生物量则与自然含水量、饱和持水量、毛管持水量和田间

持水量呈极显著正相关关系( $p<0.01$ )、与土壤 pH 值呈极显著负相关关系( $p<0.01$ )、与土壤容重、电导率呈显著负相关关系( $p<0.05$ )。总生物量与自然含水量、土壤 pH 值呈显著负相关关系( $p<0.05$ )。植物根冠比与自然含水量、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量呈极显著正相关关系( $p<0.01$ )、与土壤容重、土壤 pH 值呈显著负相关关系( $p<0.05$ )。植物含水率与自然含水量、饱和持水量呈显著负相关关系( $p<0.05$ )、与毛管持水量、田间持水量呈极显著负相关关系( $p<0.01$ )、与土壤 pH 值、土壤电导率呈极显著正相关关系( $p<0.01$ )。



注:图中数据为平均值士标准误;不同大写字母表示同一小区在篱带位置间差异显著( $p<0.05$ ),不同小写字母表示同一篱带位置在不同小区间差异显著( $p<0.05$ )。H<sub>1</sub>表示薄荷植物篱小区;H<sub>2</sub>表示白芍植物篱小区;H<sub>3</sub>表示泽兰植物篱小区;H<sub>4</sub>表示艾草植物篱小区;H<sub>5</sub>表示锦灯笼植物篱小区;H<sub>6</sub>表示鱼腥草植物篱小区;CK表示空白裸地小区。

图 1 土壤 pH 值与电导率分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of soil pH and conductivity

表 3 植物篱类型与篱带位置对土壤水盐分布影响方差分析

Table 3 Variance analysis of influence of plant type and hedgerow position on soil water and salt distribution

| 项目                  | 容重   | 自然含水量 | 饱和持水量 | 毛管持水量 | 田间持水量 | 土壤 pH 值 | 土壤电导率 |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 植物篱类型               | 0.10 | <0.00 | 0.00  | <0.00 | <0.00 | <0.00   | 0.00  |
| 篱带位置                | 0.87 | 0.05  | 0.91  | 0.81  | 0.86  | 0.76    | <0.00 |
| 植物篱类型 $\times$ 篱带位置 | 0.51 | 0.03  | 0.18  | 0.10  | 0.10  | 0.14    | 0.05  |

表 4 植物篱生理特征与土壤水盐相关系数

Table 4 Correlation coefficient between hedgerow physiological characteristics and soil water and salt

| 指标    | 容重     | 自然含水量   | 饱和持水量  | 毛管持水量   | 田间持水量   | 土壤 pH   | 土壤电导率  |
|-------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| 地上生物量 | 0.02   | -0.29** | -0.01  | -0.02   | -0.03   | -0.16   | -0.13  |
| 地下生物量 | -0.20* | 0.47**  | 0.31** | 0.44**  | 0.54**  | -0.26** | -0.20* |
| 总生物量  | -0.00  | -0.22*  | 0.03   | 0.04    | 0.04    | -0.19*  | -0.15  |
| 根冠比   | -0.18* | 0.56**  | 0.29** | 0.41**  | 0.48**  | -0.18*  | -0.12  |
| 植物含水率 | 0.15   | -0.19*  | -0.21* | -0.25** | -0.32** | 0.37**  | 0.27** |

注:\*表示显著相关( $p<0.05$ );\*\*表示极显著相关( $p<0.01$ )。

2.5 植物篱对土壤水盐影响能力综合评价

为综合评价不同植物篱对坡地表层土壤水盐分布的影响能力,将各植物篱小区内土壤水盐数据作为评价指标,进行主成分分析。主成分分析法在可以损失很少信息的前提下,将不同植物篱小区内土壤水盐指标降维简化为几个重要指标,能够很好地处理各个指标的多重相关性而又保留独立性<sup>[20-21]</sup>。通过 KMO 和 Bartlett 球形度检验,KMO 值为 0.75, Bartlett 球形度检验的相伴概率  $p<0.01$ (极显著),说明各个指标数据间存在较高的相关性,表明该数据适用主成分分析法评价(表 5)。

对主成分提取时,依据特征值大于 1 的原则,提取 2 个主成分因子,其特征值分别为 3.85,1.19,累积方差贡献率为 71.93%。将提取出的 2 个主成分分别记作  $FAC_1$ , $FAC_2$ ,得到土壤水盐分布能力评价各指标的因子得分系数矩阵表(表 6),其中土壤容重、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量在第 1 主成分( $FAC_1$ )中发挥了重要作用,自然含水量、土壤 pH、电导率在第 2 主成分( $FAC_2$ )中发挥了重要作用。

根据 2 个主成分得分系数建立主成分模型表达

表 6 植物篱土壤水盐分布影像能力评价各指标因子得分系数矩阵

| Table 6 Scoring coefficient matrix of each index factor for image ability evaluation of soil water and salt distribution of hedgerows |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 主成分   | 容重    | 自然含水量 | 饱和持水量 | 毛管持水量 | 田间持水量 | 土壤 pH | 土壤电导率 |
| $FAC_1$   | -0.22 | 0.18  | 0.24  | 0.25  | 0.24  | 0.01  | 0.01  |
| $FAC_2$   | 0.08  | 0.20  | -0.09 | 0.04  | -0.01 | 0.64  | 0.61  |

表 7 植物篱土壤水盐分布影响能力综合评价

| Table 7 Comprehensive evaluation of influence capacity of soil water and salt distribution of hedgerows |         |       |         |       |        |       |
|---|---------|-------|---------|-------|--------|-------|
| 小区  | $FAC_1$ |       | $FAC_2$ |       | 综合评价得分 |       |
|   | 得分      | 贡献率/% | 得分      | 贡献率/% | 得分     | 贡献率/% |
| $H_1$   | 5.17    | 55.00 | 9.29    | 16.94 | 4.41   | 5     |
| $H_2$   | 7.22    |       | 10.57   |       | 5.76   | 1     |
| $H_3$   | 6.00    |       | 13.08   |       | 5.52   | 2     |
| $H_4$   | 3.85    |       | 11.42   |       | 4.05   | 6     |
| $H_5$   | 5.51    |       | 11.09   |       | 4.91   | 3     |
| $H_6$   | 5.03    |       | 11.15   |       | 4.65   | 4     |

基于聚类分析法中的欧氏距离来衡量各植物篱对坡地表层土壤水盐分布影响能力,并对植物篱小区进行系统聚类<sup>[22]</sup>。结合聚类分析图和综合评价表来看,可以将 6 种植物篱分为 3 类; $H_2$  为 1 类,对坡地土壤水盐分布影响能力最强; $H_1$ , $H_3$  距离接近,对坡地土壤水盐分布影响能力中等; $H_5$ , $H_6$ , $H_4$  距离接近可归为 1 类,其对坡地土壤水盐分布影响能力相对较弱(图 2)。

式,将隶属度标准化值代入表达式,从而求出各主成分的得分,然后按照各主成分的方差百分比占总累积方差的百分率,得到各主成分的权重,最终求得土壤水盐分布影响能力综合评价函数,计算公式为: $F=0.55\times FAC_1+0.17\times FAC_2$ 。6 种植物篱对坡地土壤水盐分布影响能力综合得分排名为:白芍(5.76)>泽兰(5.52)>锦灯笼(4.91)>鱼腥草(4.65)>薄荷(4.41)>艾草(4.05)(表 7)。

表 5 主成分分析的特征值与方差贡献率

| Table 5 Characteristic value and variance contribution rate of principal component analysis |       |       |        |         |       |       |
|---|-------|-------|--------|---------|-------|-------|
| 成分  | 初始特征值 |       |        | 提取载荷平方和 |       |       |
|   | 总计    | 方差    | 累积     | 总计      | 方差    | 累积    |
|   |       | 贡献率/% | 贡献率/%  |         | 贡献率/% | 贡献率/% |
| 容重  | 3.85  | 55.00 | 55.00  | 3.85    | 55.00 | 55.00 |
| 自然含水量   | 1.19  | 16.94 | 71.93  | 1.19    | 16.94 | 71.93 |
| 饱和持水量   | 0.88  | 12.51 | 84.44  |         |       |       |
| 毛管持水量   | 0.72  | 10.26 | 94.71  |         |       |       |
| 田间持水量   | 0.28  | 3.96  | 98.67  |         |       |       |
| 土壤 pH 值   | 0.06  | 0.84  | 99.51  |         |       |       |
| 土壤电导率   | 0.03  | 0.49  | 100.00 |         |       |       |

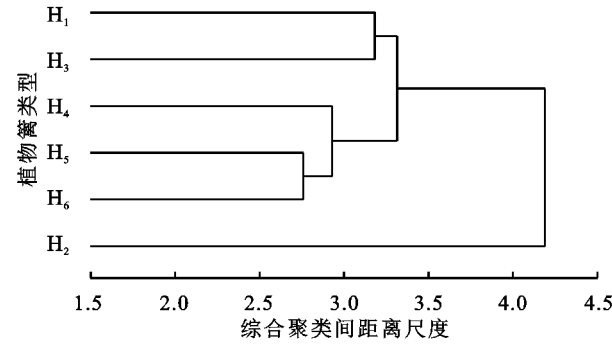


图 2 植物篱土壤水盐分布影响能力聚类分析  
Fig. 2 Cluster analysis of influence ability of soil water and salt distribution of hedgerows

3 讨论

在坡地生态系统中,表层土壤水盐受诸多内外因素影响,其分布变化最为明显和敏感<sup>[23]</sup>。植物篱作为一种具有贮蓄水分、调节养分和减少土壤侵蚀等生态效益的水土保持措施,对坡地土壤水盐分布起较大影响<sup>[24]</sup>。本试验发现 6 种植物篱带上、带中土壤水



分含量基本高于空白裸地,而带下土壤电导率则低于空白裸地。原因可能是植物篱对径流泥沙的拦截作用,植物篱作为地表植被可以减轻降水、径流冲击以及起热绝缘作用,进而对表层土壤稳定性有重要缓冲效果<sup>[25]</sup>。植物篱通过地上茎叶、地下细根等有效拦截径流和细颗粒物,并减少地表蒸发,能使篱上、篱内水分、土壤黏粒等沉积,进而促进篱带间土壤水分与土粒的重新分布,而现有研究表明土壤细颗粒物多与土壤水分呈正相关<sup>[26]</sup>,同时,伴随篱前径流大量冲刷,可能导致篱前细颗粒淤积带中土壤孔隙度增高,土壤蓄水保水性变强<sup>[27]</sup>,因而植物篱带上、带内土壤水分含量相对较高,带下水分则相对较低,这与翟婷婷等<sup>[28]</sup>研究发现植物篱带前淤积带土壤保水贮水能力优于带下的结论基本一致。此外,现有研究表明土壤盐分含量与土壤水分含量高度相关<sup>[29]</sup>,土壤中可溶性盐分基本以水为介质运移,土壤盐分多伴随径流泥沙在植物篱上、篱内淤积沉降。但是,植物篱根系生长对土壤具有穿插作用,这又促使盐分向深层土壤运移,由此可能造成植物篱带上、带内表层土壤盐分含量下降且与空白裸地相差不大,而带下则显著低于空白裸地的分布特征。

主成分分析和系统聚类等方法在土壤质量评价、土壤肥力评价和土壤内部成分变动等方面被广泛使用<sup>[30]</sup>,通过植物篱对坡地土壤水盐分布影响能力综合得分和系统聚类,获得6种植物篱对坡地表层土壤贮蓄水分、拦截盐分等能力的综合效果参考。从结果分析来看,白芍植物篱对坡地土壤水盐影响能力最强,泽兰、锦灯笼、鱼腥草、薄荷植物篱对坡地土壤水盐影响能力相对中等,而艾草植物篱则对坡地土壤水盐影响能力最弱。白芍与艾草植物篱差异较大,原因可能与植物地下生物量和地上生长形态有关。白芍植物篱的地下根系最为发达,其地下生物量、根冠比均显著高于其他5种植物篱,随着白芍地下根系逐渐加深,其对径流拦蓄、固结土体、改善土壤孔性以及增强篱带间径流入渗能力逐渐最强,因而对坡地土壤水盐分布拦截、吸收和下渗等影响能力最大。这也与王庆海等<sup>[31]</sup>发现坡地浅层土壤水分与草本植物篱根系生长分布以及根生物量密切相关,且根系长、根生物量较大植物篱更利于土壤水分拦截下渗的研究结论基本一致。艾草植物篱影响能力最差,则可能与细根较少和茎叶形态有关。从植物篱生理特征结果分析发现,艾草植物篱地下生物量较低,导致其地下根系稀疏,同时受地上茎叶生长形态影响,其植株茎秆挺立、叶片稀疏,对径流泥沙的拦截、下渗等影响能力较差,因此该植物篱对坡地水盐分布影响能力相对较弱。这也与李婷婷

等<sup>[32]</sup>发现植物生理性状差异影响坡地减流减沙效果,并且直根系、茎秆挺立和叶片稀疏植被对坡地降水径流拦截下渗效果较差的研究结论基本近似。

## 4 结论

(1) 植物篱影响坡地土壤水盐分布。与空白裸地相比,植物篱带中、带下平均土壤容重降低了9.23%,7.22%;植物篱带中平均自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量分别增加了8.10%,14.98%,21.49%,19.78%;植物篱带下平均电导率则降低了9.97%。

(2) 植物篱类型与篱带位置对土壤水盐分布存在交叉影响。其中植物篱类型显著影响自然含水量、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、pH和电导率( $p < 0.05$ ),篱带位置显著影响电导率( $p < 0.05$ ),植物篱类型 $\times$ 篱带位置则显著影响自然含水量、电导率( $p < 0.05$ )。植物篱生理特征与土壤水盐相关性显著,其中地下生物量、植物根冠比、植物含水率与土壤水盐指标之间多呈显著或极显著相关( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )。

(3) 各植物篱对土壤水盐分布影响能力综合能力存在差异。其中白芍植物篱对坡地表层土壤水盐分布影响能力最强,艾草植物篱则最弱,其原因可能与植物篱地下细根分布和地上茎叶形态有关。因此防治坡地水盐流失时可优选白芍植物篱,若采取艾草植物篱,则宜采取混交种植模式并合理布局。

### 参考文献:

- [1] 王世林,曹文侠,王小军,等.河西走廊荒漠盐碱地人工柽柳林土壤水盐分布[J].应用生态学报,2019,30(8):2531-2540.  
Wang S L, Cao W X, Wang X J, et al. Distribution of soil moisture and salt of *Tamarix ramosissima* plantation in desert saline-alkali land of Hexi Corridor Region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(8):2531-2540.
- [2] 冯亚亚,汪季,党晓宏,等.土壤水盐因子对盐湖防护林体系植被群落分布的影响[J].水土保持通报,2021,41(2):43-50.  
Fei Y Y, Wang J, Dang X H, et al. Effects of soil water and salt factors on vegetation community distribution in a salt lake shelterbelt system[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(2):43-50.
- [3] 马俊逸,赵成章,苟芳珍,等.盐沼湿地植物的群落分类及其空间分布格局对土壤水盐的响应[J].干旱区研究,2020,37(4):1001-1008.  
Ma J Y, Zhao C Z, Gou F Z, et al. Response of the spatial distribution and community types of wetland plants to soil moisture and salinity in a salt marsh[J]. Arid Zone Research, 2020,37(4):1001-1008.



- [4] 孙浩峰,张丽萍,高雅玉,等.半干旱黄土丘陵区坡地紫花苜蓿种植模式与径流的关系[J].草业科学,2014,31(5):922-926.  
Sun H F, Zhang L P, Gao Y Y, et al. The relationship between sloping fields alfalfa cropping pattern and runoff in Semi-arid Loess Hilly Area[J]. Pratacultural Science, 2014,31(5):922-926.
- [5] 陈蝶,卫伟.植物篱的生态效益研究进展[J].应用生态学报,2016,27(2):652-662.  
Chen D, Wei W. Ecological benefits of the hedgerows: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(2):652-662.
- [6] 李铁,湛芸,何丙辉,等.天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用[J].水土保持学报,2019,33(3):27-35.  
Li T, Chen Y, He B H, et al. Study on soil and water conservation effects of *Vetiveria zizanioides* and *Leucaena leucocephala* Hedgerows with different planting years in central hill region of Sichuan Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):27-35.
- [7] 李海强,郭成久,李勇,等.植物篱对坡面土壤养分流失的影响[J].水土保持研究,2016,23(5):42-48.  
Li H Q, Guo C J, Li Y, et al. Effects of hedgerows on soil nutrient losses on the sloping farmlands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(5):42-48.
- [8] 湛芸,何丙辉,向明辉,等.紫色土坡耕地植物篱的水土保持效应研究[J].水土保持学报,2013,27(2):47-52.  
Chen Y, He B H, Xiang M H, et al. Effects of hedgerow on soil and water conservation in sloping cropland of the purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(2):47-52.
- [9] 王针针,刘泉宏,湛芸,等.紫色土区植物篱篱前淤积带与篱下土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(5):61-67.  
Wang Z Z, Liu X H, Chen Y, et al. Study on soil anti-erodibility between sedimentation zone in front of hedgerows and ridge behind hedgerows in purple soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(5):61-67.
- [10] 刘家鹤,牛伊宁,罗珠珠,等.黄土高原坡耕地植物篱—作物间作系统水分利用特征研究[J].草业学报,2018,27(6):111-119.  
Liu J H, Niu Y N, Luo Z Z, et al. Soil water utilization characteristics of slope land in hedgerow and grain crop intercropping systems on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(6):111-119.
- [11] 黄小芳,丁树文,柯慧燕,等.三峡库区植物篱模式对土壤理化性质和可蚀性的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):9-15,22.  
Huang X F, Ding S W, Ke H Y, et al. Effects of hedgerow patterns on soil physical and chemical properties and erodibility in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):9-15,22.
- [12] 王恒松,张芳美.黔西北乡土植物篱对典型石漠化区石灰土侵蚀动力学过程的调控[J].水土保持学报,2019,33(4):16-23,80.  
Wang H S, Zhang F M. Regulation of native hedgerow on the kinetic process of limestone erosion in typical rocky desertification areas of northwest Guizhou [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(4):16-23,80.
- [13] 党汉瑾,党宏忠,王玉魁,等.半干旱区柠条植物篱水分再分配格局研究[J].林业科学研究,2014,27(6):745-751.  
Dang H J, Dang H Z, Wang Y K, et al. Soil water redistribution pattern of caragana intermedia hedgerow system in semi-arid area[J]. Forest Research, 2014,27(6):745-751.
- [14] 郭萍,夏振尧,高峰,等.香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(19):105-112.  
Guo P, Xia Z Y, Gao F, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):105-112.
- [15] 党宏忠,党汉瑾,李卫,等.黄土区两种植物篱不同部位土壤持水特征对比[J].水土保持通报,2015,35(3):78-84.  
Dang H Z, Dang H J, Li W, et al. Comparison of soil water retention characteristics for different part of two kinds of hedgerow system in Loess Area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(3):78-84.
- [16] 杨红宾,王胜,殷溶,等.紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(6):1316-1326.  
Yang H B, Wang S, Yin R, et al. Effects of crop-mulberry system on phosphorus loss in sloping cropland with purple soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(6):1316-1326.
- [17] 陈正发,史东梅,金慧芳,等.基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2019,35(3):256-267.  
Chen Z F, Shi D M, Jin H F, et al. Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil management assessment framework (SMAF) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(3):256-267.
- [18] 董茜,王根柱,庞丹波,等.喀斯特区不同植被恢复措施土壤质量评价[J].林业科学研究,2022,35(3):169-178.

- Dong Q, Wang G Z, Pang D B, et al. Soil quality evaluation of different vegetation restoration measures in karst area[J]. Forest Research, 2022,35(3):169-178.
- [19] 周林虎,王昊宇,张秉来,等.硫酸盐渍土表观电导率与水分、盐分及粒径关系研究[J].干旱区研究,2021,38(4):1020-1030.
- Zhou L H, Wang H Y, Zhang B L, et al. The relationship between ECa of sulfate saline soil and moisture content, salt content, and particle size[J]. Arid Zone Research, 2021,38(4):1020-1030.
- [20] Adhikari P, Shukla M K, Mexal J G, et al. Assessment of the soil physical and chemical properties of desert soils irrigated with treated wastewater using principal component analysis[J]. Soil Science, 2011, 176(7):356-366.
- [21] 袁星明,朱宁华,郭耆,等.南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J].林业科学研究, 2022,35(3):112-122.
- Yuan X M, Zhu N H, Guo Q, et al. Effects of different plantations on soil physical and chemical properties and soil quality evaluation in south subtropical zone[J]. Forest Research, 2022,35(3):112-122.
- [22] 郑敏娜,梁秀芝,李荫藩,等.晋北盐碱区不同种植年限人工紫花苜蓿草地土壤质量的评价[J].草地学报, 2017,25(4):888-892.
- Zheng M N, Liang X Z, Li Y F, et al. Assessment of soil quality of alfalfa field with different growing years in the saline alkali area of northern Shanxi Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017,25(4):888-892.
- [23] 张雪妮,李岩,何学敏,等.水盐变化对荒漠植物功能多样性与物种多样性关系的影响[J].生态学杂志,2019, 38(8):2354-2360.
- Zhang X N, Li Y, He X M, et al. Effects of soil water and salinity on relationships between desert plant functional diversity and species diversity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(8):2354-2360.
- [24] 杜雨佳,赵勇钢,刘小芳,等.黄土丘陵区柠条种植带状结构对坡面土壤水分的影响[J].水土保持研究,2020, 27(6):52-59.
- Du Y J, Zhao Y G, Liu X F, et al. Effects of strip *Caragana korshinskii* plantation on soil moisture at hill-slope scale in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(6):52-59.
- [25] 刘剑荣,杨磊,卫伟,等.半干旱黄土区柠条灌丛不同植被管理方式下的土壤水分[J].草业科学,2021,38(8): 1439-1450.
- Liu J R, Yang L, Wei W, et al. Soil moisture in different vegetation management methods of *Caragana korshinskii* shrub in the semi-arid loess area[J]. Pratical Science, 2021,38(8):1439-1450.
- [26] 刘斐耀,尤全刚,吴思渊,等.干旱区绿洲耕地撂荒与复耕对土壤水力性质的影响[J].中国沙漠,2021,41(6): 169-178.
- Liu F Y, You Q G, W S Y, et al. Effects of abandonment and recultivation of farmland on soil hydraulic properties in a typical oasis of arid regions[J]. Journal of Desert Research, 2021,41(6):169-178.
- [27] 吕文星,张洪江,程金花,等.三峡库区植物篱对土壤理化性质及抗蚀性的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):69-73,78.
- Lv W X, Zhang H J, Cheng J H, et al. Effects on soil physicochemical properties and anti-erosion caused by plant hedgerows in Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(4): 69-73,78.
- [28] 翟婷婷,湛芸,李铁,等.植物篱篱前淤积带与篱下土坎土壤水库和抗剪性能对比研究[J].生态学报,2020,40(2):599-607.
- Zhai T T, Chen Y, Li T, et al. Comparative study on soil water reservoirs and shear strength between the sedimentation zone in front of and ridge behind hedgerows[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):599-607.
- [29] 廖海,栗现文,陈俊英,等.原状盐渍土不同盐分含量对土壤水分特征曲线的影响[J].节水灌溉,2021(1):7-13.
- Liao H, Li X W, Chen J Y, et al. Effects of different salt contents of undisturbed saline soil on soil moisture characteristic curves[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1):7-13.
- [30] 张智勇,刘广全,艾宁,等.吴起县退耕还林后主要植被类型土壤质量评价[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):81-87.
- Zhang Z Y, Liu G Q, Ai N, et al. Soil quality evaluation of main vegetation types after conversion of farmland to forest in Wuqi County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(2):81-87.
- [31] 王庆海,庞卓,郑瑞伦,等.模拟降雨条件下草篱对坡地浅层土壤水分分布特征的影响[J].水土保持学报, 2016,30(4):110-115,122.
- Wang Q H, Pang Z, Zheng R L, et al. Effect of contour grass hedges on water distribution characteristics in shallow-layer soil of sloping cropland under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):110-115,122.
- [32] 李婷婷,何铁光,俞月凤,等.桂东北坡地果园生草栽培减流减沙效应[J].水土保持通报,2020,40(2):31-36.
- Li T T, He T G, Yu Y F, et al. Effects of runoff and sediment reduction by sod culture in sloping orchards in Northeastern Guangxi Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(2):31-36.