

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.010; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.010.

韩彦隆, 魏亚娟, 左小锋, 等. 吉兰泰荒漠绿洲过渡带土壤生态化学计量特征及养分恢复状况研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 207-214, 223.  
Han Yanlong, Wei Yajuan, Zuo Xiaofeng, et al. Study on soil stoichiometry characteristics and nutrient restoration status in the Jilantai desert oasis ecotone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 207-214, 223.

# 吉兰泰荒漠绿洲过渡带土壤生态化学计量特征及 养分恢复状况研究

韩彦隆<sup>1</sup>, 魏亚娟<sup>1,2</sup>, 左小锋<sup>1,3</sup>, 左轶璆<sup>1</sup>, 康帅<sup>2</sup>, 童国利<sup>4</sup>, 李建媛<sup>4</sup>, 王永平<sup>5</sup>

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.包头师范学院 生态环境学院, 内蒙古 包头 014030;  
3.北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875;  
4.内蒙古信中生态环境技术有限公司, 呼和浩特 010020; 5.西藏自治区拉萨市曲水县水利局, 拉萨 850600)

**摘 要:**[目的]探究不同下垫面土壤养分及其生态化学计量的变化特征, 阐明植被演替与土壤性状之间的耦合关系, 进而为该区域的植被恢复提供理论依据。[方法]基于野外取样与室内实验相结合的方法, 以吉兰泰荒漠绿洲过渡带 4 种下垫面(流动沙地、半固定沙地、固定沙地和防护林地)为研究对象, 分析了 0—30 cm 浅层土壤容重(BD)、土壤含水量(SM)、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其生态化学计量特征, 从而揭示不同下垫面土壤养分含量和生态化学计量比分布特征以及与土壤环境因子之间的关系。[结果](1) 吉兰泰荒漠绿洲过渡带不同下垫面土壤指标均符合正态分布( $p>0.05$ )。从变异系数来看, BD 和土壤孔隙度(STP)属于弱变异性, 其余指标属于强变异性。(2) 除 TP 和 BD 外, 其他指标大小均表现为: 防护林地>固定沙地>流动沙地>半固定沙地, 说明绿洲化过程有利于土壤养分蓄积;(3) 各下垫面土壤 C:N, C:P 和 N:P 随土层深度变化各异。不同下垫面 C:N, C:P 和 N:P 分别介于 2.94~70.00, 6.89~240.95, 0.64~23.22。(4) 不同下垫面土壤养分恢复指数表现为: 防护林地>固定沙地>半固定沙地。[结论]人工植被建群更有利于土壤养分蓄积, 研究结果为荒漠绿洲过渡带植被恢复和保护提供基础资料。

**关键词:**土壤养分; 生态化学计量; 下垫面; 荒漠绿洲过渡带; 吉兰泰

中图分类号:S151.9<sup>+</sup>3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)02-0207-08

## Study on soil stoichiometry characteristics and nutrient restoration status in the Jilantai desert-oasis ecotone

Han Yanlong<sup>1</sup>, Wei Yajuan<sup>1,2</sup>, Zuo Xiaofeng<sup>1,3</sup>, Zuo Yiqiu<sup>1</sup>,  
Kang Shuai<sup>2</sup>, Tong Guoli<sup>4</sup>, Li Jianyuan<sup>4</sup>, Wang Yongping<sup>5</sup>

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.College of Ecology and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China; 3.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-Sand Control, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4.Inner Mongolia Xinzhong Ecological Environment Technology Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 5.Water Conservancy Bureau of Qushui, Lhasa, Xizang Autonomous Region, Lhasa 850600, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the characteristics of soil nutrients and their ecological stoichiometry on different underlying surfaces, to clarify the coupling relationship between vegetation succession and soil properties, and to provide a theoretical basis for vegetation restoration in the region. [Methods] Based on a combination of field sampling and indoor experiments, four types of underlying

收稿日期:2024-04-11

修回日期:2024-05-16

接受日期:2024-05-21

资助项目:自治区高等学校碳达峰碳中和研究专项(STZX202213);高层次人才引进项目(BTTCRCQD2024-003);国家自然科学基金(4196700)

第一作者:韩彦隆(1988—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,讲师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:hanyl11@126.com

通信作者:魏亚娟(1994—),女,内蒙古赤峰人,博士,讲师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:weiyajuan0305@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

surfaces (shifting sandy land, semi-fixed sandy land, fixed sandy land and sheltered forest land) were selected in Jilantai desert-oasis ecotone. Soil bulk density (BD), soil moisture (SM), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus content (TP) and stoichiometry at a depth of 30 cm were measured to reveal the distribution characteristics of soil nutrient contents and stoichiometric ratios in different underlying surfaces, as well as the correlation with other environmental factors. [Results] (1) The soil indexes of different underlying surfaces in Jilantai desert-oasis ecotone were in accordance with normal distribution ( $p > 0.05$ ). In terms of coefficients of variation, BD and soil total porosity (STP) were weakly variable, whereas the remaining indicators were strongly variable. (2) Except for TP and BD, other indicators decreased in the order: sheltered forest land > fixed sandy land > mobile sand dunes > semi fixed sandy land, indicating that the process of oasis transformation was beneficial for soil nutrient accumulation. (3) The ratios of C : N, C : P, and N : P of soils different underlying surfaces varied with the depth of soil layer. The ratios of C : N, C : P, and N : P in different underlying surfaces ranged from 2.94 to 70.00, 6.89 to 240.95, and 0.64 to 23.22, respectively. (4) The soil nutrient recovery index in different underlying surfaces decreased in the order: sheltered forest > fixed sandy land > semi fixed sandy land. [Conclusion] Artificial vegetation is more conducive to soil nutrient accumulation. These research results can provide basic information for vegetation restoration and conservation of desert-oasis ecotone.

**Keywords:** soil nutrients; ecological stoichiometry; underlying surface; desert-oasis ecotone; Jilantai

荒漠绿洲过渡带不仅是连接荒漠和绿洲的重要纽带,还是绿洲化过程和荒漠化过程最活跃的临界界面,在维护绿洲稳定、减弱风沙流、固定流沙方面发挥着极其重要的作用<sup>[1]</sup>。由于荒漠绿洲过渡带水热环境因子存在较大差异,导致其具有敏感、脆弱和易变的特点。绿洲不断扩张导致荒漠绿洲植被、土壤、地貌等急剧变化,影响着局域内土壤营养构成<sup>[2]</sup>。目前国内外学者对荒漠绿洲过渡带的研究主要集中于气候变化状况<sup>[3]</sup>、植被养分富集<sup>[4]</sup>、植物水文特征<sup>[5]</sup>和地表风沙活动等<sup>[6]</sup>方面。然而,土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)生态化学计量比,作为生态系统养分循环的核心内容,影响着土壤养分的供应能力和储存能力。荒漠绿洲过渡带土壤生态化学计量比与下垫面密切相关,不同下垫面植被覆盖度不同,导致土壤养分含量、分布特征和土壤养分恢复状态存在较大差异<sup>[1]</sup>。

生态化学计量主要用于探索生物体养分耦合循环和元素平衡过程,是当前生态研究的热点<sup>[6-7]</sup>。土壤作为植物生长的基础,其 C、N 和 P 是植物生长发育的重要物质来源,影响着生态系统中养分吸收和有机质分解速率等一系列生物生化过程<sup>[8-10]</sup>。现阶段,对生态化学计量比的研究主要集中于湿地<sup>[11]</sup>、草原<sup>[12]</sup>、森林<sup>[13]</sup>和荒漠等<sup>[14]</sup>生态系统。而且,这些研究更多探讨不同生态系统优势种养分生态化学计量对外界环境变化的响应机制。而对荒漠绿洲过渡带这一特殊地带研究较少。例如,周晓兵等<sup>[1]</sup>对塔克拉玛干沙漠荒漠绿洲过渡带研究表明,土地利用方式有

利于荒漠绿洲过渡带土壤养分增加,对生态系统稳定有促进作用。孙雪等<sup>[2]</sup>对河西走廊荒漠绿洲过渡带研究表明,土壤含水量、土壤酸碱度和土壤孔隙度是影响土壤生态化学计量的主要影响因子。但是,荒漠绿洲过渡带由于所处地理位置各异,导致气候区土壤质地、人类活动和植被类型存在较大差异,尤其 0—30 cm 土层深度最易受到外界干扰<sup>[3,9-10]</sup>。

本文研究区地处乌兰布和沙漠西南缘,气候条件异常恶劣,土壤保肥能力较差。以吉兰泰荒漠绿洲过渡带 3 种典型下垫面为研究对象,流动沙地作为对照,探究 3 种下垫面土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)的分布特征、生态化学计量比和土壤养分恢复状况。揭示不同下垫面土壤 C、N 和 P 物质循环过程,为我国荒漠绿洲过渡带土壤养分平衡和循环提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

吉兰泰荒漠绿洲过渡带(105°47′08″—105°37′38″E, 39°46′58″—39°48′95″N)位于乌兰布和沙漠西南缘,属于典型的温带大陆性季风气候。该区域海拔在 960~1 030 m。研究区多年平均降水量为 138.6 mm,降水主要集中在 7 月、8 月、9 月,占全年降雨量的 91.77%。年均潜在蒸发量为 3 006 mm,极端最高气温为 40.4 ℃,年均气温为 8.6 ℃,极端最低气温为 -31.2 ℃。年日照时数为 3 316 h,无霜期为 160 d。年均风速 3.5 m/s,

主风向为西北风。试验点主要布设在吉兰泰荒漠绿洲过渡带,其下垫面由内向外依次为:防护林地、固定沙地、半固定沙地和流动沙地,该区域地势平坦,无人作为活动干扰。土壤类型为盐碱土、风沙土,地表土壤疏松。土壤 pH 值为 8.51~9.08,各下垫面具体情况见图 1 和表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与样品采集 2022 年 8 月下旬植被生长最旺盛期,在实地探查的基础上,选择有代表性的下垫面作为采样点。在每个下垫面选取长势均匀的植被群落分别布设 5 个 10 m×10 m 样地,调查植物的种类、数量和密度等,并在样地内利用五点法设置 5 个 1 m×1 m 草本样方,调查样方内草本植物类型、盖度、地表枯落物等指标。与此同时,在完成植被调查基础上,用环刀分别采集 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 土层深度土壤样品,重复取 5 组。

土壤样品需要采集两份,一份原状土用于土壤含水量(SM)、土壤容重(BD)和土壤孔隙度(STP)测定。另一份将 5 个采样点同一土层的土壤均匀混合装入塑封袋并进行编号。

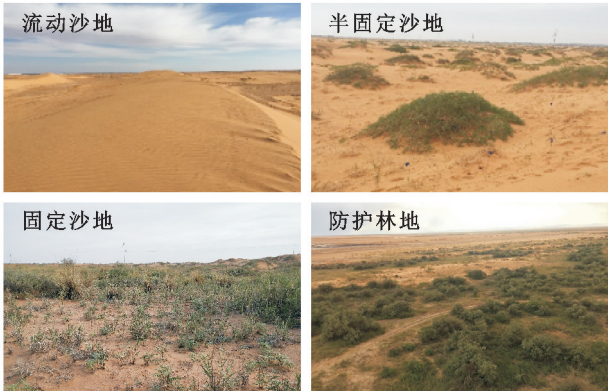


图 1 吉兰泰荒漠绿洲过渡带 4 类下垫面  
Fig. 1 Four types of underlying surfaces in Jilantai desert-oasis ecotone

表 1 不同下垫面基本情况

Table 1 Basic information in different underlying surfaces

下垫面	植被盖度/%	生物量/ (g·m <sup>-2</sup> )	枯落物/ (g·m <sup>-2</sup> )	优势种
流动沙地	5.56±1.15d	8.31±2.19d	0d	沙米( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )、猪毛菜( <i>Salsola collina</i> )
半固定沙地	17.65±4.79c	149.24±29.38c	12.38±5.16c	白刺( <i>Nitraria tangutorum</i> )、白沙蒿( <i>Artemisia blepharolepis</i> )
固定沙地	32.23±8.45b	407.58±83.69b	55.27±19.48b	芨芨草( <i>Neotrinia splendens</i> )、苦豆子( <i>Sophora alopecuroides</i> )、披针叶野决明( <i>Thermopsis lanceolata</i> )、白刺
防护林地	66.12±12.34a	4418.03±937.29a	100.45±44.17a	花棒( <i>Hedysarum scoparium</i> )、沙枣( <i>Elaeagnus angustifolia</i> )、梭梭( <i>Haloxyylon ammodendron</i> )、白刺

注:小写字母表示不同下垫面指标差异显著( $p<0.05$ )。

1.2.2 土壤样品测定 土壤含水量用烘干法测定;土壤容重用环刀法测定。土壤样品带回实验室经自然风干去除动植物残体后,按四分之一法选取其中一份用于土壤养分分析。土壤样品经过球磨仪研磨后过 0.25 mm 筛后,用于 SOC, TN, TP 测定。土壤 SOC, TN 和 TP 分别采用重铬酸钾容量法-外加热法、高氯酸-硫酸消化法和酸溶-钼锑抗比色法进行测定<sup>[15]</sup>。并利用变异系数对各下垫面土壤理化性质及其生态化学计量特征的变异情况进行分析。其公式如下:

$$CV=\frac{SD}{MV}\times100\%$$

(1)

式中:CV 为变异系数;BD 为标准偏差;MV 为平均值。CV≤20.0% 属弱变异性,20.0%<CV<50.0% 属中等变异性,CV≥50.0% 属强变异性<sup>[16]</sup>。

1.2.3 土壤养分恢复状况 土壤养分恢复指数(NRI)<sup>[17]</sup>,以流动沙地土壤为研究对象,计算不同下垫面土壤 SOC, TN, TP 与流动沙地土壤的差异,然

后将各下垫面的差值求和平均,以定量描述不同下垫面对土壤养分的影响程度。

$$NRI=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{X_i-X'_i}{X_i}\times100\%$$

(2)

式中: $X_i$  为下垫面土壤第  $i$  层土壤养分值; $X'_i$  为流动沙地第  $i$  层土壤养分值; $n$  为下垫面个数。

1.3 数据处理

本文土壤生态化学计量比均为质量比。对各土壤养分指标及其生态化学计量比进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),数据表达形式为平均值±标准差。运用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同下垫面土壤理化指标与生态化学计量比变异特征

由表 1 知,吉兰泰荒漠绿洲过渡带不同下垫面土壤指标均符合正态分布( $p>0.05$ )。其中,SM, BD 和 STP 的平均值分别为 4.27%, 1.63 g/cm<sup>3</sup>, 38.71%。由此



可知,吉兰泰荒漠绿洲过渡带土壤含水量整体含量较低,土壤容重较大,导致土壤孔隙度较低。土壤 SOC,TN 和 TP 含量平均值分别为 1.64,0.13,0.03 g/kg,说明研究区土壤养分贫瘠。土壤 C : N,C : P 和 N : P 平均值分别为 30.70,63.71,4.29。从变异系数来看,BD 和 STP 属于弱变异性,其余指标属于强变异性。

2.2 各下垫面土壤理化性质和生态化学计量比变化特征

由表 2 可知,双因素交互分析发现,下垫面和土层深度对 SM,SOC,TN,C : N,C : P 和 N : P 均有显著影响。而下垫面仅对 BD 和 TP 有显著影响。下垫面×土层深度对 SM,BD,STP,SOC,TN,TP,C : N,C : P 和 N : P 均有显著影响。

表 2 下垫面和土层深度对土壤理化性质的影响

Table 2 Impact of underlying surfaces and soil depth on soil physical and chemical properties and stoichiometric characteristics

因素	F 值								
	SM	BD	STP	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P
下垫面	1043.99 **	4.04 **	2.355	210.943 **	1409.365 **	8.264 **	9.131 **	56.765 **	118.386 **
土层深度	154.724 **	1.897	0.28	24.873 **	175.426 **	1.44	5.143 **	10.137 **	12.327 **
下垫面×土层深度	98.571 **	3.763 **	2.582 *	9.677 **	298.375 **	7.004 **	5.228 **	5.327 **	18.676 **

注:\*表示  $p<0.05$  的显著性;\*\*表示  $p<0.01$  的显著水平。

由图 2 知,平均 BD 由大到小依次为:流动沙地>半固定沙地>固定沙地>防护林地。各下垫面 BD 随土层深度表现各异。在 0—5 cm,4 种下垫面 BD 差异不显著 ( $p>0.05$ );在 5—10 cm,10—20 cm 和 20—30 cm,半固定沙地、固定沙地与流动沙地 BD 差异不显著 ( $p>0.05$ )。防护林地 BD 较流动沙地分别减小 6.02%,8.64%和 9.04% ( $p<0.05$ ),说明人工植被营建对土壤容重影响显著。

平均 SM 和 STP 由大到小依次为:防护林地>固定沙地>半固定沙地>流动沙地,说明由内到外土壤含水量逐渐降低。除流动沙地外,各下垫面土壤含水量随土层深度而逐渐增大。在 0—5 cm 和 20—30 cm,半固定沙地、固定沙地和防护林地 SM 是流动沙地的 1.72 倍、3.76 倍、6.64 倍和 1.19 倍、2.81 倍、4.99 倍 ( $p<0.05$ )。在 5—10 cm,半固定沙地和固定沙地 SM 较流动沙地分别降低 57.14%和 18.57%,防护林地增加 192.86% ( $p<0.05$ )。在 10—20 cm,半固定沙地较流动沙地 SM 降低 21.79%,固定沙地和防护林地分别增加 101.28%和 589.74% ( $p<0.05$ )。

在 0—5 cm,10—20 cm 和 20—30 cm,各下垫面 STP 差异不显著 ( $p>0.05$ );在 5—10 cm,半固定沙地、固定沙地、防护林地 STP 较流动沙地分别增加 4.27%,10.70%和 7.56% ( $p<0.05$ );对流动沙地、半

表 1 各下垫面土壤理化性质与生态化学计量变异特征

Table 1 Characteristics of soil physical and chemical properties and stoichiometric variations of different underlying surfaces

指标	最大值	最小值	平均值	变异系数	$p$	$N$
SM/%	26.88	0.24	4.27	149.34	2.043	60
BD/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.82	1.43	1.63	5.01	0.766	60
STP/%	48.29	31.25	38.71	7.69	0.612	60
SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.65	0.27	1.64	85.12	1.525	60
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.91	0.01	0.13	51.26	1.596	60
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.05	0.01	0.03	51.11	0.84	60
C : N	138.2	1.9	30.70	84.50	1.374	60
C : P	301.19	5.48	63.71	89.88	1.505	60
N : P	30.67	0.43	4.29	153.08	2.396	60

注: $p$  为 K-S 检验  $p$  值; $N$  为样本数。

固定沙地和固定沙地 STP 不同土层深度之间不显著 ( $p>0.05$ )。在防护林地,20—30 cm STP 较 0—5 cm 分别增加 7.80% ( $p<0.05$ )。

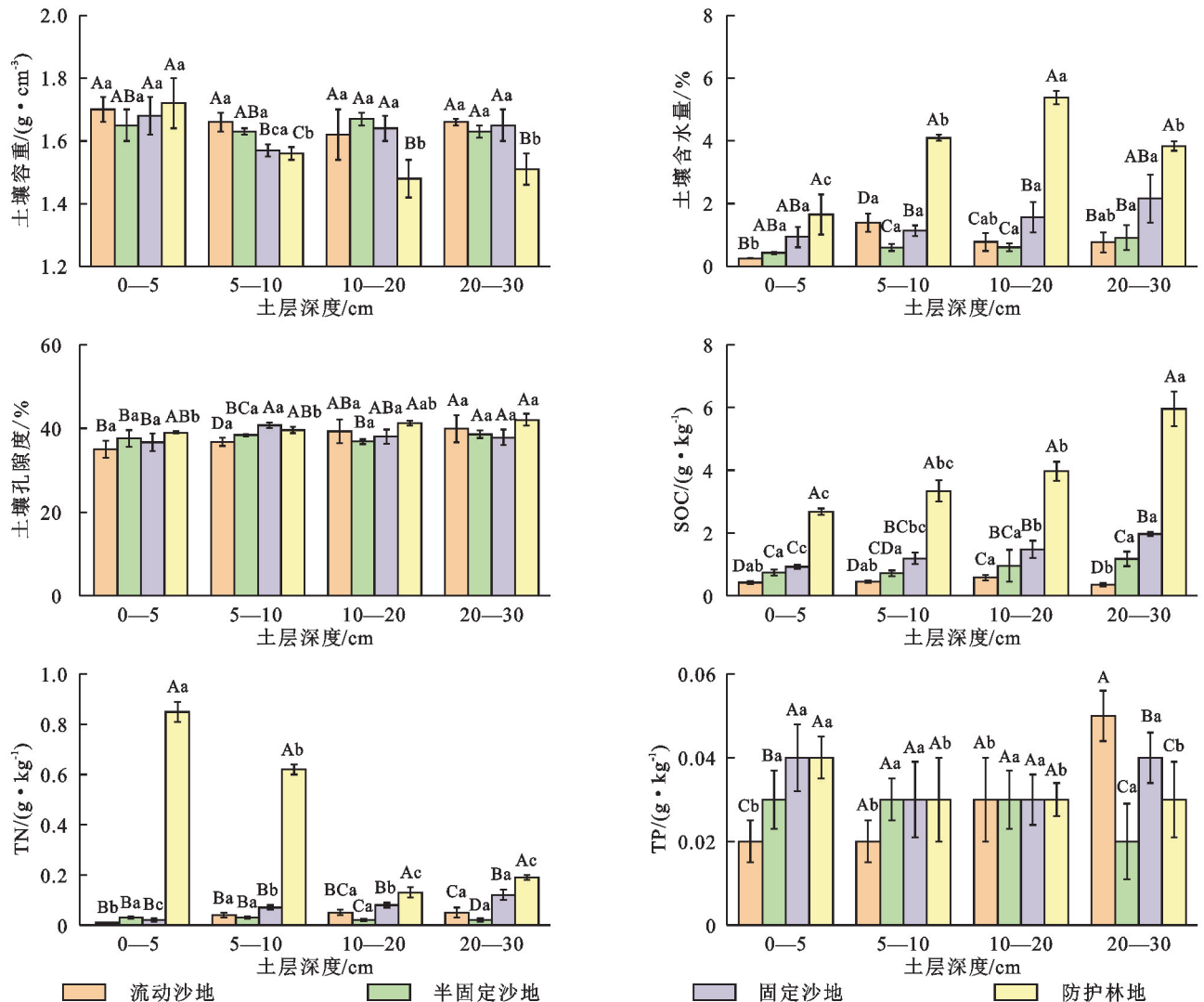
各下垫面平均土壤 SOC 含量大小依次为:防护林地>固定沙地>半固定沙地>流动沙地。半固定沙地、固定沙地和防护林地土壤 SOC 分别是流动沙地 1.59~3.39 倍、2.22~5.70 倍和 6.42~17.26 倍。对流动沙地和盐碱滩地而言,各土层深度土壤 SOC 呈先增后减的变化趋势;半固定沙地与之相反。对固定沙地和防护林地而言,土壤 SOC 随土层深度逐渐增加。

各下垫面平均土壤 TN 含量大小依次为:防护林地>固定沙地>流动沙地>半固定沙地。在 0—5 cm 和 5—10 cm,防护林地分别是流动沙地的 85 倍和 15.5 倍 ( $p<0.05$ )。在 10—20 cm 和 20—30 cm,半固定沙地较流动沙地均降低 60.00%,固定沙地和防护林地较流动沙地分别增加 75.00%,60.00%和 145.00%,160.00% ( $p<0.05$ )。对流动沙地和固定沙地而言,土壤 TN 含量随土层深度增加而增大,半固定沙地与之相反。防护林地 TN 含量随土层深度增加呈先减后增的变化趋势。

各下垫面平均土壤 TP 含量大小依次为:固定沙地>防护林地>流动沙地>半固定沙地。在 0—5 cm,半固定沙地、固定沙地和防护林地 TP 含量是流动沙地

1.50 倍、2.0 倍和 2.0 倍;在 5—10 cm 和 10—20 cm,各下垫面土壤 TP 含量差异不显著( $p>0.05$ );在 20—30 cm,

半固定沙地、固定沙地、防护林地土壤 TP 含量较流动沙地分别降低 60.00%、20.00%和 40.00%( $p<0.05$ )。



注:不同大写字母表示同一土层下不同下垫面之间存在显著差异( $p<0.05$ ),不同小写字母表示同一下垫面不同土层之间达到显著差异( $p<0.05$ )。下图同。

图2 不同下垫面土壤理化性质

Fig. 2 Soil physical and chemical properties of different underlying surfaces

### 2.3 不同下垫面土壤 SOC, TN, TP 生态化学计量比变化特征

由图 3 可知,各下垫面土壤 C:N, C:P 和 N:P 随土层深度变化各异。不同下垫面 C:N, C:P 和 N:P 分别介于 2.94~70.00, 6.89~240.95, 0.64~23.22。对土壤 C:N 而言,在 0—5 cm,固定沙地土壤 C:N 较流动沙地增加 61.47%,而防护林地却减少 90.88%( $p<0.05$ );在 5—10 cm,半固定沙地和固定沙地土壤 C:N 较流动沙地分别增加 138.62%, 56.75%,防护林地减少 49.29%( $p<0.05$ );在 10—20 cm 和 20—30 cm,半固定沙地、固定沙地和防护林地土壤 C:N 分别是流动沙地的 8.21 倍、3.53 倍、3.39 倍和 22.81 倍、12.49 倍、9.89 倍( $p<0.05$ )。对土壤 C:P 而言,不同土层深度流动沙地土壤 C:P 与半

固定沙地和固定沙地差异不显著( $p>0.05$ ),与防护林地差异性显著( $p<0.05$ )。在 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 和 20—30 cm,防护林地土壤 C:P 分别是流动沙地的 2.06 倍、4.47 倍、4.72 倍和 33.97 倍( $p<0.05$ )。对土壤 N:P 而言,在 0—5 cm, 5—10 cm 和 20—30 cm,流动沙地土壤 N:P 与半固定沙地和固定沙地差异不显著( $p>0.05$ ),与防护林地差异性显著( $p<0.05$ ),防护林地土壤 N:P 分别是流动沙地的 31.94 倍、9.27 倍和 2.08 倍( $p<0.05$ )。在 10—20 cm,流动沙地土壤 N:P 与半固定沙地和固定沙地差异显著( $p<0.05$ ),半固定沙地和固定沙地土壤 N:P 较流动沙地分别减少 81.12%, 55.16% ( $p<0.05$ ),与防护林地差异不显著( $p>0.05$ )。

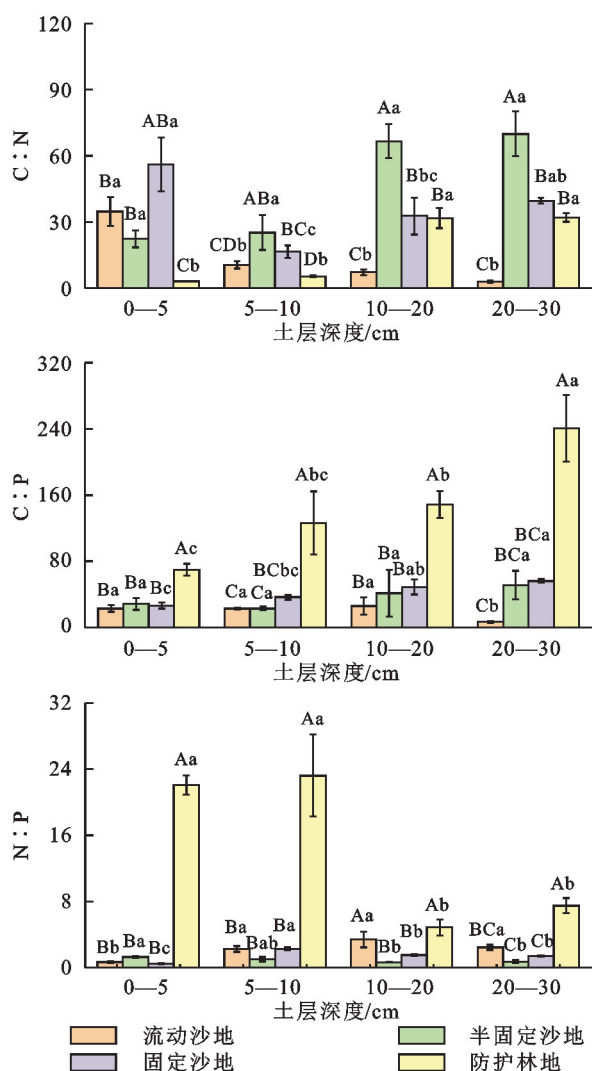


图 3 不同下垫面土壤 C, N, P 生态化学计量特征

Fig. 3 Soil C, N and P stoichiometric characteristics in different underlying surfaces

#### 2.4 不同下垫面土壤养分恢复指数变化特征

由图 4 可知,不同下垫面土壤养分恢复指数总体表现为:防护林地(9.99%)>固定沙地(0.94%)>半固定沙地(0.45%),且不同下垫面土壤养分恢复指数差异显著( $p < 0.05$ )。就同一土层下不同下垫面而言,除土层 5—10 cm 外,其他土层深度防护林地土壤养分恢复指数与半固定沙地和固定沙地差异显著( $p < 0.05$ );就同一下垫面不同土层而言,防护林地土壤养分恢复指数各土层之间差异显著( $p < 0.05$ ),而固定沙地和半固定沙地土壤养分恢复指数各土层之间不差异显著( $p > 0.05$ )。

### 3 讨论

土壤 SOC, TN 和 TP 作为植物生长发育重要的生源元素,其含量与降水、气候、土壤质地、人类活动和植被类型密切相关<sup>[18]</sup>。本研究中,吉兰泰荒漠绿洲过渡带 4 类下垫面(流动沙地、半固定沙地、固定沙

地和防护林地)平均土壤 SOC 含量较低,介于 0.45~3.99 g/kg。吉兰泰降水稀少且土壤类型为风沙土,加之植被盖度低,不利于土壤养分固存<sup>[6]</sup>。另外,半固定沙地、固定沙地和防护林地平均土壤 SOC 含量分别是流动沙地的 0.99 倍、2.09 倍和 7.86 倍,且 SOC 含量随着土层深度逐渐降低。一方面说明了不同下垫面土壤养分累积效应不同<sup>[19]</sup>。不同下垫面建群种及其伴生种类不同,使不同下垫面植被类型、植被盖度、枯落物和土壤特性存在差异性(表 1),土壤养分分解和淋溶存在较大程度不同<sup>[20]</sup>。另一方面说明了人工植被营建更有利于土壤养分增加。固定沙地和防护林地的优势种均为灌木,高大的植株截获与集聚了大量的细颗粒物物质和凋落物,为土壤有机碳增加和表聚作用奠定了基础。双因素分析也证明了这一点<sup>[21]</sup>。研究中还发现,流动沙地、半固定沙地、固定沙地和防护林地平均土壤 TN 和 TP 含量分别为 0.04, 0.03, 0.07, 0.45 g/kg 和 0.03, 0.03, 0.04, 0.03 g/kg,说明了防护林地土壤全氮含量得到了极大程度提高,其他下垫面土壤全氮、全磷没有变化。而且,除防护林地土壤 TP 有明显的表聚作用外,其他下垫面土壤 TN 和 TP 含量没有明显变化。研究区降水量低使养分元素的淋溶作用弱,迁移率低导致外源养分输入较少,导致土层之间养分含量差异较小<sup>[22]</sup>。

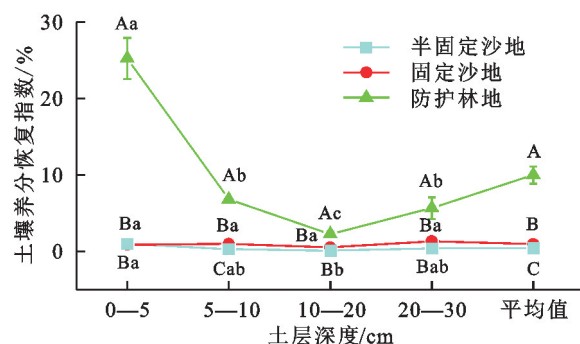


图 4 不同下垫面土壤养分恢复指数

Fig. 4 Soil nutrient restoration index for in different underlying surfaces

土壤生态化学计量比反映了土壤养分转化和动态平衡。其中, C : N 表征有机碳的分解速率, C : P 表征磷的释放与吸收能力, N : P 则表征了土壤氮磷的限制作用和阈值<sup>[23]</sup>。本研究各下垫面平均土壤 C : N 介于 13.88~46.07, 远大于中国土壤 C : N 平均值(10~12)<sup>[24]</sup>, 说明不同下垫面土壤均表现为氮素严重缺乏。该研究与魏亚娟等<sup>[6]</sup>对白刺灌丛沙堆的结果一致。而且, 半固定沙地和防护林地土壤 C : N 随着土层深度逐渐增加, 说明土壤氮素缺乏程度随土层逐渐加重<sup>[20]</sup>。固定沙地土壤 C : N 随着土层深度降低, 说明土壤氮素缺乏程度逐渐减弱, 这主要与植被类

型有关,固定沙地主要是草本植物(表1),草本植物枯落物更容易腐烂,释放更多的氮素。当  $C:P < 200$  时,磷的释放速率大于固持速率,表示磷的有效性越高<sup>[17]</sup>。各下垫面平均土壤  $C:P$  介于  $19.77 \sim 146.46$ ,说明荒漠绿洲过渡带各下垫面土壤磷的有效性更高,表现为净矿化。而且,磷的有效性随着土层深度逐渐加强。说明了表层土壤磷的固持作用更强。这可能与植被类型根系分布和土壤结构作用有关。本研究中,各下垫面(流动沙地、半固定沙地、固定沙地和防护林地)平均土壤  $N:P$  分别为  $2.18, 0.91, 1.42, 14.41$ ,除半固定沙地外,该研究结果显著高于中国温带荒漠  $N:P$  平均值  $(1.2)^{[25]}$ ,说明流动沙地、半固定沙地、固定沙地主要受氮的限制,而防护林地植物生长主要受到氮磷共同限制。

土壤养分恢复指数作为表征生态修复措施对土壤养分恢复程度的指示指标<sup>[17]</sup>。本研究中,各下垫面土壤养分恢复指数总体表现为:防护林地>固定沙地>半固定沙地,这主要取决于植被类型。在荒漠绿洲过渡带,植物生物量和土壤养分是影响生态系统的重要基础。不同下垫面由于其植被类型不同,导致植物群落结构、光合作用、养分利用率和生物量不同,进而影响下垫面养分的积累和分配<sup>[26]</sup>。在半固定沙地,主要植被类型为白刺灌丛和白沙蒿。但是,其植被盖度和枯落物较低,有机质输入匮乏,加之风沙土不利于土壤养分蓄存,导致土壤养分恢复水平较差。而在固定沙地,其植被类型主要为白刺、披针叶野决明、苦豆子和芨芨草等,生活型为灌木和多年生草本。与半固定沙地相比,其植被盖度、生物量和枯落物有一定提高,但是有机质的输入仍然是有限的<sup>[27]</sup>。而在防护林地主要栽植的是花棒、沙枣和梭梭3种抗旱生树种,其中还有自然植被白刺。该下垫面较高的植被盖度、生物量和枯落物为有机物的输入、养分蓄积和草本植物入侵奠定了基础,加快了防护林地土壤养分恢复速率<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

(1) 各下垫面有利于土壤养分累积,累积效果存在差异。其中,半固定沙地、固定沙地和防护林地平均土壤 SOC 含量分别是流动沙地的 0.99 倍、2.09 倍和 7.86 倍。

(2) 各下垫面土壤  $C:N$ ,  $C:P$  和  $N:P$  分别介于  $2.94 \sim 70.00, 6.89 \sim 240.95, 0.64 \sim 23.22$ 。下垫面类型、土层深度及其两者交互作用显著影响土壤  $C$ ,  $N$ ,  $P$  和生态化学计量比。

(3) 人工植被建植更有利于土壤养分蓄积。各

下垫面土壤养分恢复指数总体表现为:防护林地>固定沙地>半固定沙地。

## 参考文献 (References):

- [1] 周晓兵,陶冶,吴林,等.塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(3):969-980.  
Zhou X B, Tao Y, Wu L, et al. Soil stoichiometry in different land-use categories in desert-oasis ecotones of the southern Taklimakan Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(3):969-980.
- [2] 孙雪,龙永丽,刘乐,等.河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征[J].环境科学,2023,44(6):3353-3363.  
Sun X, Long Y L, Liu L, et al. Soil stoichiometry characterization in the oasis-desert transition zone of Linze, Zhangye [J]. Environmental Science, 2023,44(6):3353-3363.
- [3] 罗凤敏,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北部不同下垫面的小气候变化特征[J].农业工程学报,2020,36(10):124-133.  
Luo F M, Gao J L, Xin Z M, et al. Microclimate variations of different underlying surfaces in northeastern Ulan Buh Desert in Inner Mongolia of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(10):124-133.
- [4] 魏亚娟,党晓宏,汪季,等.枝条覆盖对平茬花棒生长特征和浅层土壤水分的影响[J].生态学报,2020,40(3):931-939.  
Wei Y J, Dang X H, Wang J, et al. Effects of branch mulch on growth characteristics and surface soil moisture of clipping *Hedysarum scoparium* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(3):931-939.
- [5] 魏亚娟.吉兰泰盐湖防护体系功能区生态效益研究及其优化配置[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.  
Wei Y J. Study on ecological benefits and optimal configuration of Jilantai Salt Lake protection system [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [6] 魏亚娟,汪季,党晓宏,等.干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮磷密度与生态化学计量特征[J].水土保持学报,2022,36(3):259-266.  
Wei Y J, Wang J, Dang X H, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus densities and ecological stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):259-266.
- [7] 魏亚娟,汪季,党晓宏,等.白刺灌丛沙堆演化过程中叶片  $C$ ,  $N$ ,  $P$ ,  $K$  含量及其生态化学计量的变化特征[J].中南林业科技大学学报,2021,41(10):102-110,139.  
Wei Y J, Wang J, Dang X H, et al. Contents and stoichiometric characteristics of  $C$ ,  $N$ ,  $P$  and  $K$  in leaves process of *Nitraria tangutorum* succession [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,



- 2021,41(10):102-110,139.
- [8] Liu X, Ma J, Ma Z W, et al. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. Catena, 2017,150:146-153.
- [9] 高君亮,罗凤敏,高永,等.农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2019,39(15):5594-5602.
- Gao J L, Luo F M, Gao Y, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(15):5594-5602.
- [10] 高君亮,罗凤敏,段娜,等.绿洲化对土壤养分及化学计量特征的影响[J].水土保持研究,2019,26(4):50-55.
- Gao J L, Luo F M, Duan N, et al. Soil nutrient and stoichiometry characteristics in process of oasisization in the Ulan Buh Desert Oasis, Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):50-55.
- [11] 黄庄,黑杰,刘旭阳,等.互花米草入侵对滨海湿地不同质地土壤碳氮磷及其生态化学计量比的影响[J].土壤,2023,55(2):340-347.
- Huang Z, Hei J, Liu X Y, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon, nitrogen and phosphorus and their ecological stoichiometric ratios in coastal wetlands of different textures[J]. Soils, 2023,55(2):340-347.
- [12] 王淼,张宇,李瑞强,等.放牧强度对羊草草甸草原植物器官及群落氮磷化学计量的影响[J].中国农业科学,2022,55(7):1371-1384.
- Wang M, Zhang Y, Li R Q, et al. Effects of grazing disturbance on the stoichiometry of nitrogen and phosphorus in plant organs of *Leymus chinensis* meadow steppe[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022,55(7):1371-1384.
- [13] 王轶浩,周建岗,符裕红.林龄对重庆武陵山区马尾松天然次生林 C、N、P 生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2022,42(23):9537-9547.
- Wang Y H, Zhou J G, Fu Y H. Effects of stand ages on C, N and P stoichiometry of *Pinus massoniana* secondary forests in Wuling Mountain Area of Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(23):9537-9547.
- [14] 魏亚娟,党晓宏,汪季,等.不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量特征[J].水土保持学报,2021,35(2):377-384.
- Wei Y J, Dang X H, Wang J, et al. Characterization of the soil ecological stoichiometry of *Nitraria tangutorum* nebkhas during different succession stages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):377-384.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等.喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J].北京林业大学学报,2019,41(3):80-92.
- Wu P, Cui Y C, Zhao W J, et al. Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of Maolan karst forest vegetation, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(3):80-92.
- [17] 程才,李玉杰,张远东,等.石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2020,40(24):9234-9244.
- Cheng C, Li Y J, Zhang Y D, et al. Effects of moss crusts on soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics in karst rocky desertification region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(24):9234-9244.
- [18] Westheimer F H. Why nature chose phosphates[J]. Science, 1987,235(4793):1173-1178.
- [19] 魏亚娟,刘美英,解云虎,等.吉兰泰盐湖防护体系建立38a以来土壤养分特征[J].干旱区研究,2023,40(5):747-755.
- Wei Y J, Liu M Y, Xie Y H, et al. Characteristics of soil nutrient accumulation after 38 years of the Jilantai Salt Lake protection system[J]. Arid Zone Research, 2023,40(5):747-755.
- [20] 南富森,李宗省,张小平,等.黄河北岸兰州段丘陵区土壤生态化学计量与空间变异[J].中国沙漠,2022,42(5):167-176.
- Nan F S, Li Z S, Zhang X P, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry characteristics of hilly soil in Lanzhou section of Yellow River north shore[J]. Journal of Desert Research, 2022,42(5):167-176.
- [21] Zhang G F, Zhao L W, Yang Q Y, et al. Effect of desert shrubs on fine-scale spatial patterns of understory vegetation in a dry-land[J]. Plant Ecology, 2016,217(9):1141-1155.
- [22] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, et al. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites: implications for measuring soil carbon stocks[J]. Geoderma, 2007,141(3/4):272-282.
- [23] 黄磊,张永娥,邵芳丽,等.冀北山地天然次生林土壤生态化学计量特征及影响因素[J].生态学报,2021,41(15):6267-6279.
- Huang L, Zhang Y E, Shao F L, et al. Soil ecological stoichiometry and its influencing factors in natural secondary forest, North Mountain of Hebei Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(15):6267-6279.



- thermodynamic technology applied in the research of sap flow [J]. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2007, 23(4): 119-123.
- [19] 党宏忠,冯金超,韩辉.沙地樟子松边材液流速率的方位差异特征[J].林业科学, 2020, 56(1): 29-37.
- Dang H Z, Feng J C, Han H. Characteristics of azimuthal variation of sap flux density in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* grown in sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(1): 29-37.
- [20] 党宏忠,却晓娥,冯金超,等.晋西黄土区苹果树边材液流速率对环境驱动响应[J].应用生态学报, 2019, 30(3): 823-831.
- Dang H Z, Que X E, Feng J C, et al. Response of sap flow rate of apple trees to environmental factors in Loess Plateau of Western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 823-831.
- [21] Zhang J G, Guan J H, Shi W Y, et al. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semi-arid black locust plantation, Loess Plateau, China[J]. Ecohydrology, 2015, 8(1): 137-147.
- [22] Ryan M G, Phillips N, Bond B J. The hydraulic limitation hypothesis revisited[J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(3): 367-381.
- [23] 李浩,胡顺军,朱海,等.基于热扩散技术的梭梭树干液流特征研究[J].生态学报, 2017, 37(21): 7187-7196.
- Li H, Hu S J, Zhu H, et al. Characterization of stem sapflow *Haloxyylon ammodendron* by using thermal dissipation technology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7187-7196.
- [24] 孔喆,陈胜楠,律江,等.欧美杨单株液流昼夜组成及其影响因素分析[J].林业科学, 2020, 56(3): 8-20.
- Kong Z, Chen S N, Lü J, et al. Characteristics of *Populus euramericana* sap flow over day and night and its influencing factors [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(3): 8-20.
- [25] Zhao C Y, Si J H, Feng Q, et al. Nighttime transpiration of *Populus euphratica* during different phenophases[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(2): 435-444.
- [26] 朱仲龙,贾忠奎,马履一,等.休眠前期玉兰树干液流的变化及其对环境因子的响应[J].应用生态学报, 2012, 23(9): 2390-2396.
- Zhu Z L, Jia Z K, Ma L, et al. Dynamic change of *Yulania* sap flow before dormancy in response to environmental factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2390-2396.
- [27] Olsen J E. Light and temperature sensing and signaling in induction of bud dormancy in woody plants[J]. Plant Molecular Biology, 2010, 73(1): 37-47.

~~~~~

(上接第 214 页)

- [24] 魏红,满秀玲.中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征[J].植物生态学报, 2019, 43(10): 843-852.
- Wei H, Man X L. Carbon storage and its allocation in *Betula platyphylla* forests of different ages in cold temperate zone of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(10): 843-852.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1): 139-151.
- [26] 代林利,陈义堂,伍丽华,等.不同林分密度杉木林养分积累与垂直空间分配[J].应用生态学报, 2022, 33(2): 311-320.
- Dai L L, Chen Y T, Wu L H, et al. Characteristics of nutrient accumulation and vertical spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* plantation with different stand densities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 311-320.
- [27] Lesschen J P, Cammeraat L H, Kooijman A M, et al. Development of spatial heterogeneity in vegetation and soil properties after land abandonment in a semi-arid ecosystem [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(11): 2082-2092.
- [28] 李欣颖,张萌,郭洋楠,等.采煤沉陷区林下植物多样性与土壤因子的关系[J].水土保持学报, 2022, 36(1): 268-276.
- Li X Y, Zhang M, Guo Y N, et al. Relationship between understory plant diversity and soil factors in coal mining subsidence area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 268-276.