

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.033.

赵恩辉, 吴磊, 赵生华. 黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 255-263.

Zhao Enhui, Wu Lei, Zhao Shenghua. Comprehensive Evaluation of Soil Water Conservation Function of Different Vegetation Types in the Yellow River Delta[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 255-263.

# 黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价

赵恩辉<sup>1</sup>, 吴磊<sup>2</sup>, 赵生华<sup>3</sup>

(1.唐山市水利规划设计研究院, 河北 唐山 063000;

2.北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 3.中国建筑股份有限公司, 北京 100029)

**摘要:** [目的]揭示不同植被类型土壤物理性质的差异,明确植被类型对土壤水源涵养功能的影响,以期评估黄河三角洲植被恢复的生态水文效应提供科学依据。[方法]选取刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柳树(*Salix psammophila*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)为研究对象,分析0—30 cm土层土壤容重、孔隙度、持水能力、入渗性能的变化特征,利用主成分分析评价了黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能。[结果]刺槐、柳树、白蜡、对照样地0—30 cm土层土壤容重依次为1.28, 1.33, 1.39, 1.44 g/cm<sup>3</sup>,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度分别为46.36%~51.75%, 38.52%~40.91%, 7.24%~12.21%;与对照相比,刺槐、柳树、白蜡土壤容重分别降低了11.11%, 7.64%, 3.47%,土壤孔隙度也存在不同程度的增大。4个样地0—30 cm土层土壤最大持水量差异显著( $p < 0.05$ ),其数值依次为517.50, 501.00, 480.87, 463.61 t/hm<sup>2</sup>;毛管持水量和非毛管持水量无显著差异( $p > 0.05$ ),其数值分别为385.23~409.06 t/hm<sup>2</sup>, 72.39~122.11 t/hm<sup>2</sup>。刺槐、柳树、白蜡、对照样地稳定入渗率依次为4.91, 2.89, 4.05, 1.02 mm/min,与对照相比分别提高381.37%, 183.33%, 297.06%;4个入渗模型的拟合优度表现为Horton模型>通用经验模型>Kostiakov模型>Philip模型,Horton模型能更好地模拟研究区土壤入渗过程。通过主成分分析可以得到两个主成分,累计贡献率高达99.896%;各个样地土壤水源涵养功能综合排序表现为刺槐>白蜡>柳树>对照。[结论]从土壤结构、持水能力、渗透性能等方面考虑,刺槐林对黄河三角洲土壤改良效果最佳,白蜡林次之,柳树林最差。可在研究区及与其生境类似的区域优先考虑刺槐树种。

**关键词:** 水源涵养功能; 黄河三角洲; 土壤水文效应; 入渗

中图分类号: S157; S715.7; S727.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0255-09

## Comprehensive Evaluation of Soil Water Conservation Function of Different Vegetation Types in the Yellow River Delta

Zhao Enhui<sup>1</sup>, Wu Lei<sup>2</sup>, Zhao Shenghua<sup>3</sup>

(1. Tangshan Institute of Water Resources Planning and Design, Tangshan,

Hebei 063000, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 3. China State Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100029, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the differences in soil physical properties among different vegetation types, clarify the impact of vegetation types on soil water conservation function, and provide scientific basis for the evaluation of ecological and hydrological effects of vegetation restoration in the Yellow River Delta. [Methods] *Robinia pseudoacacia*, *Salix psammophila*, *Fraxinus chinensis* were selected as the research objects. The characteristics of the soil bulk density, porosity, water holding capacity and infiltration characteristics with 0—30 cm soil layer were studied and the soil water conservation function of different vegetation types was evaluated by principal component analysis. [Results] Soil bulk density of

收稿日期: 2022-11-01

修回日期: 2022-11-09

资助项目: 国家自然科学基金“水资源-能源纽带关系与保障风险综合模型体系与应用”(51879010)

第一作者: 赵恩辉(1981—), 女, 河北邢台人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程设计研究。E-mail: zhaoeh1981@163.com

<http://stbcy.paperonce.org>

*Robinia pseudoacacia*, *Salix psammophila*, *Fraxinus chinensis*, bare land with 0—30 cm soil layer was 1.28, 1.33, 1.39, and 1.44 g/cm<sup>3</sup>, and the total soil porosity, capillary porosity, and non-capillary porosity were 46.36%~51.75%, 38.52%~40.91%, 7.24%~12.21%, respectively. Compared with bare land, the soil bulk density of *Robinia pseudoacacia*, *Salix psammophila*, *Fraxinus chinensis* decreased by 11.11%, 7.64%, and 3.47%, respectively, and the soil porosity increased. The maximum soil water holding capacities of 0—30 cm soil layer in the four sample plots were significantly different ( $p < 0.05$ ), and the values were 517.50, 501.00, 480.87, and 463.61 t/hm<sup>2</sup>. The capillary and non-capillary water holding capacities of 0—30 cm soil layer in the four sample plots were not significantly different ( $p > 0.05$ ), and the values were 385.23~409.06 t/hm<sup>2</sup> and 72.39~122.11 t/hm<sup>2</sup>, respectively. The stable infiltration rates of *Robinia pseudoacacia*, *Salix psammophila*, *Fraxinus chinensis*, bare land were 4.91, 2.89, 4.05, and 1.02 mm/min, which were 381.37%, 183.33%, and 297.06% higher than the bare land, respectively. The goodness of fit of the four infiltration models was Horton>general empirical>Kostiakov>Philip, Horton model could better simulate the soil infiltration process in the study area. Two principal components could be obtained by principal component analysis, and the cumulative contribution rate was 99.896%. Through principal component analysis, two principal components could be obtained, and the cumulative contribution rate was as high as 99.896%. The comprehensive order of soil water conservation function in the four sample plots was *Robinia pseudoacacia* > *Fraxinus chinensis* > *Salix psammophila* > bare land. [Conclusion] Judging from soil structure, water holding capacity and permeability, the soil improvement effect of *Robinia pseudoacacia* was better than *Salix psammophila* and *Fraxinus chinensis*. *Robinia pseudoacacia* may be prioritized in the Yellow River Delta and in areas similar to its habitat.

**Keywords:** water conservation function; Yellow River Delta; soil hydrological effect; infiltration

森林生态系统水源涵养功能的实质是林冠层、枯枝落叶层以及土壤层 3 个作用层对降水再分配的过程和能力,起到拦蓄降水、削减洪峰、调节径流、净化水质等作用,是森林生态系统的重要功能之一<sup>[1]</sup>。不同林分类型的林分组成、林冠结构、根系构型及其分布、生物学特性不同,其具有的水源涵养功能也有所差异<sup>[2]</sup>。土壤层是森林生态系统水源涵养功能的第三层,经地表径流入渗到土壤中的水分,一部分用于水分蒸发和植被根系吸收,一部分则存储在土壤中或以地下径流形式汇入地下水,体现森林水源涵养功能<sup>[3]</sup>。相关研究表明,土壤层是森林生态系统水源涵养功能的主要载体,其调节能力占 90% 以上<sup>[4]</sup>。土壤层水源涵养功能主要体现在土壤的蓄水能力和渗透能力<sup>[5]</sup>,是评价土壤水分调节能力和涵养水源的重要指标<sup>[6]</sup>,对森林生态系统涵养水源、保持水土、调节水分具有重要意义。土壤是水分贮存的主要场所,其贮存量和贮存方式受土壤孔隙的数量、大小及分布特征的影响<sup>[7]</sup>。土壤渗透性是评价土壤水分调节能力和林分涵养水源的重要指标之一<sup>[6]</sup>。因此,研究土壤蓄水能力和渗透能力对森林生态系统水源涵养功能具有重要意义。黄河三角洲地区地处《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》《山东半岛蓝色经济区发展

规划》两大国家战略重叠地带,地理位置优越,开发前景广阔,土地资源丰富。然而,黄河三角洲生态环境脆弱,土壤盐渍化区域分布广泛,干旱胁迫严重,土地生产力差,植被恢复与生态重建受到限制。研究不同植被类型土壤物理性质和水源涵养功能的差异,有助于黄河三角洲土壤环境质量的改善和植被恢复重建。因此,本文以黄河三角洲刺槐、柳树、白蜡为研究对象,以无林地为对照,对比分析不同植被类型 0—30 cm 土层土壤容重和孔隙度、持水能力、入渗性能的变化特征及其差异,综合评价土壤水源涵养功能,以期为黄河三角洲植被恢复与重建、树种选择以及水源涵养林建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市,属黄河三角洲区域,大陆性季风气候,年均降雨量 550 mm,年均蒸发量 1 800 mm,年均气温 12.2℃,无霜期 200 d。土壤主要由冲积性黄土母质发育而来,土壤质地以粉砂为主,地下水水质矿化度较高,土壤盐分主要为氯化钠,其含盐量 0.7% 左右,pH 值 8.7 左右。研究区天然植被以芦苇 (*Phragmites australis*)、茅草 (*Imperata cylindrica*)、

怪柳 (*Tamarix chinensis*) 等为主, 人工林以刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、白蜡 (*Fraxinus chinensis*)、杨树 (*Populus euramericana*)、柳树 (*Salix psammophila*) 等为主。

1.2 研究方法

在研究区选取刺槐、柳树、白蜡、无林地(对照)为研究对象, 3种植被类型均为人工林, 林龄均为 23 a, 基本情况详见表 1。每种植被类型设置一个 20 m×20 m 样地, 每个样地内布设 3 个 1 m×1 m 具有代表性的样方, 分别采集每个样方 0—10、10—20、20—30 cm 土层范围内的原状土和松散土样, 用于测定土壤容重和孔隙度等土壤物理性质<sup>[8]</sup>, 并根据土壤孔隙度和土层深度相乘计算得到土壤持水量<sup>[9]</sup>。采用双环入渗法测定不同植被类型土壤入渗性能。其中, 双环入渗仪的内环直径为 15 cm, 外环直径为 30 cm, 水头高为 5 cm。试验结束后, 整理分析并计算入渗特征指标, 同时采用 Horton 模型 $[f(t)=a+be^{-kt}]$ 、通用经验模型 $[f(t)=a+bt^{-n}]$ 、Kostiakov 模型 $[f(t)=at^{-b}]$ 、Philip 模型 $[f(t)=st^{-0.5}+a]$ 拟合各样地土壤水分入渗过程<sup>[10]</sup>。

表 1 研究区样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots in the research area						
样地	平均 树高/m	平均 胸径/cm	株行距/ (m×m)	平均 枝下高/m	平均 冠幅/m	郁闭度
刺槐	12.28	15.36	2.0×2.0	2.58	5.21	0.8
柳树	13.98	19.25	2.0×2.0	2.31	6.51	0.7
白蜡	13.24	18.58	2.0×2.0	3.12	5.84	0.8

采用主成分分析方法评价黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能。主成分分析法的原理是从多个变量中提取出少量的、抽象的指标, 通过筛选指标、无量纲化、确定相关性、获取主成分等手段评价研究对象, 也可通过 SPSS 软件计算主成分得分, 进而分析、评价各样地水源涵养功能。本文选取土壤容重( $C_1$ )、最大持水量( $C_2$ )、毛管持水量( $C_3$ )、非毛管持水量( $C_4$ )、初始入渗率( $C_5$ )、稳定入渗率( $C_6$ )、平均入渗率( $C_7$ )作为评价指标, 采用主成分分析法评价评价黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能。

2 结果与分析

2.1 土壤容重和孔隙度

土壤容重反映土壤结构和松紧程度的重要指标, 其数值大小不仅直接影响土壤通气能力和透水能力, 还可以反映森林植被对土壤物理性质的改良效果, 常用于评价森林土壤水源涵养功能的优劣<sup>[11-12]</sup>。由表 2 可知, 随着土层深度的增大, 4 个样地土壤容重均呈

现增大趋势, 且增加幅度有所不同, 刺槐和柳树表现为 10—20 cm 和 20—30 cm 土层显著大于 0—10 cm ( $p<0.05$ ), 而白蜡和对照样地则表现为 3 个土层均差异显著 ( $p<0.05$ )。对比 4 个样地可知, 0—10、10—20、20—30、0—30 cm 土层土壤容重均表现为差异显著 ( $p<0.05$ ), 且对照样地显著大于其他 3 个样地 ( $p<0.05$ ); 刺槐、柳树、白蜡、对照样地 0—30 cm 土层土壤容重依次为 1.28、1.33、1.39、1.44 g/cm<sup>3</sup>, 相比于对照样地, 其他 3 个样地土壤容重分别降低了 11.11%、7.64%、3.47%, 说明研究区采取植被恢复措施可以较好地改善土壤结构, 调节土壤蓄水、透水能力, 其中以刺槐的改良效果最佳。

土壤孔隙度可以为植被提供水和空气, 由毛管孔隙度和非毛管孔隙度组成。毛管孔隙度是植被所能吸持的水分, 用于植被自身的生长发育, 反映了土壤蓄水能力; 非毛管孔隙度则反映了土壤通气透水的性能, 主要表现在水源涵养和削减洪峰等方面<sup>[13-14]</sup>。由表 2 可知, 土壤总孔隙度变化规律与土壤容重相反, 表现为随土层深度增大而减小, 刺槐、柳树、白蜡、对照样地 0—30 cm 土壤总孔隙度依次为 51.75%、50.10%、48.08%、46.36%, 且 3 个样地显著大于对照样地 ( $p<0.05$ )。随着土层深度的增大, 毛管孔隙度逐渐增大, 且同一样地不同土层存在差异; 对于不同样地而言, 柳树样地各个土层毛管孔隙度均显著大于其他样地 ( $p<0.05$ )。对比 4 个样地 0—30 cm 土层毛管孔隙度可知, 柳树最大, 刺槐和对照次之, 白蜡最小, 但 4 个样地无显著差异 ( $p>0.05$ ), 说明柳树样地土壤有效水较高, 有利于植被根系吸收水分。非毛管孔隙度随土层深度的变化规律与总孔隙度相一致, 0—10 cm 土层最大, 10—20 cm 土层次之, 20—30 cm 土层最小, 3 个土层均差异显著 ( $p<0.05$ )。对比不同样地非毛管孔隙度可知, 各土层均表现为刺槐显著大于其他样地 ( $p<0.05$ ), 对照显著小于其他样地 ( $p<0.05$ ), 而 0—30 cm 土层则表现为无显著差异 ( $p>0.05$ ), 其数值大小表现为刺槐>白蜡>柳树>对照, 说明 3 种植被类型土壤通气透水性能优于对照样地。

2.2 土壤持水能力

土壤持水能力是评价土壤水源涵养功能的主要指标之一, 受土壤孔隙状况和土层深度共同决定<sup>[11]</sup>。由图 1 可知, 不同样地最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量存在一定差异。随着土层深度的增大, 4 个样地土壤最大持水量均呈现减小趋势, 且减小幅度不同, 刺槐、柳树、白蜡、对照样地 0—10 cm 土层土壤最大持水量依次为 528.13、514.93、499.54、483.04 t/hm<sup>2</sup>, 20—30 cm 土层则分别减小为 509.44、490.74、

462.14,443.45 t/hm<sup>2</sup>。毛管持水量的变化规律与最大持水量有所不同,反映了不同植被类型在供给植物水分及其利用效率等方面存在差异,表现为随着土层深度的增大而增加;同时,毛管持水量与最大持水量的比值也具有一致的变化规律,这有利于植被对

土壤水分的吸收与利用;刺槐、柳树、白蜡、对照样地毛管持水量与最大持水量的比值依次为 0.72~0.80, 0.76~0.88, 0.74~0.87, 0.77~0.93, 其变化幅度较大,说明不同样地的供水能力差异较大,其中以对照样地波动幅度最大,柳树和白蜡次之,刺槐最小。

表 2 各样地土壤容重和孔隙度

Table 2 Soil bulk density and porosity with different sample plots					
样地	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
刺槐	0—10	1.25±0.01bD	52.81±0.38aA	37.86±0.96bB	14.96±0.86aA
	10—20	1.29±0.01aD	51.49±0.19bA	39.81±0.35aAB	11.68±0.45bA
	20—30	1.30±0.01aD	50.94±0.38bA	40.95±0.51aB	10.00±0.45cA
	0—30	1.28±0.03C	51.75±0.96A	39.54±1.56A	12.21±2.52A
柳树	0—10	1.29±0.02bC	51.49±0.69aB	39.26±0.09cA	12.23±0.70aBC
	10—20	1.34±0.02aC	49.73±0.57bB	40.49±0.66bA	9.24±1.06bB
	20—30	1.36±0.01aC	49.07±0.33bB	42.96±0.65aA	6.11±0.60cB
	0—30	1.33±0.04BC	50.10±1.25AB	40.91±1.88A	9.19±3.06A
白蜡	0—10	1.33±0.02cB	49.95±0.50aC	36.82±0.74cB	13.14±1.24aB
	10—20	1.39±0.02bB	48.08±0.57bC	38.63±0.33bC	9.46±0.67bB
	20—30	1.45±0.02aB	46.21±0.50cC	40.13±0.28aB	6.09±0.63cB
	0—30	1.39±0.06AB	48.08±1.87BC	38.52±1.66A	9.56±3.53A
对照	0—10	1.38±0.01cA	48.30±0.19aD	36.97±0.53cB	11.33±0.36aC
	10—20	1.44±0.02bA	46.43±0.57bD	39.04±0.48bBC	7.39±0.68bC
	20—30	1.50±0.02aA	44.34±0.69cD	41.36±0.94aB	2.99±1.63cC
	0—30	1.44±0.06A	46.36±1.98C	39.12±2.20A	7.24±4.17A

注:不同小写字母表示同一样地不同土层差异显著( $p<0.05$ ),不同大写字母表示同一土层不同样地差异显著( $p<0.05$ )。下同。

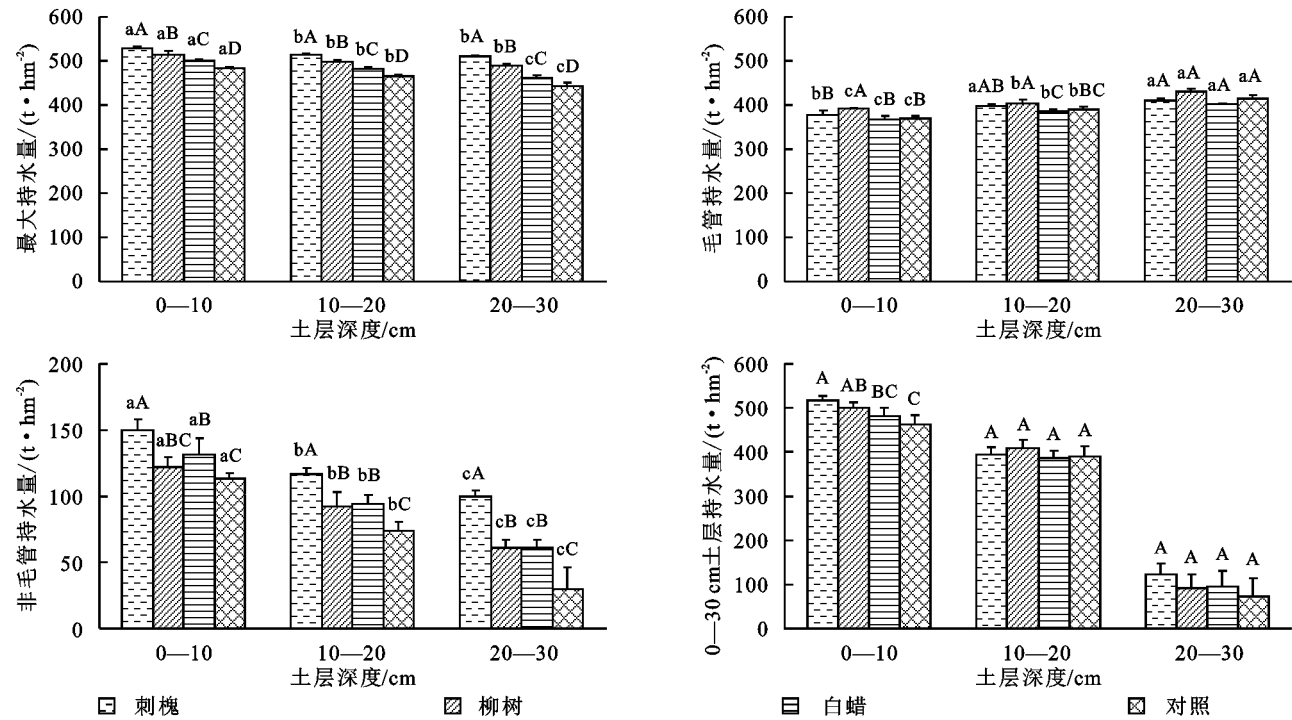


图 1 各样地土壤持水量  
Fig. 1 Soil moisture capacity with different sample plots



非毛管持水量的变化规律与最大持水量相一致,刺槐、柳树、白蜡、对照样地 0—10 cm 土层土壤非毛管持水量依次为 149.57,122.30,131.37,113.34 t/hm<sup>2</sup>,20—30 cm 土层则分别减小为 99.97,61.14,60.88,29.88 t/hm<sup>2</sup>。4 个样地 0—10 cm 土层土壤非毛管持水量显著大于 10—20 cm 和 20—30 cm 土层( $p<0.05$ ),这与枯落物分解、植物根系、土壤团粒结构、微生物活动强度等有关,不仅说明 0—10 cm 土层水源涵养功能最强,而且还反映了不同植被类型水源涵养能力主要取决于表层土壤。刺槐、柳树、白蜡、对照样地 0—30 cm 土层土壤最大持水量依次为 517.50,501.00,480.87,463.61 t/hm<sup>2</sup>,4 个样地均差异显著( $p<0.05$ );毛管持水量依次为 395.39,409.06,385.23,391.22 t/hm<sup>2</sup>,非毛管持水量依次为 122.11,91.95,95.61,72.39 t/hm<sup>2</sup>,4 个样地无显著差异( $p>0.05$ )。与对照样地相比,刺槐、柳树、白蜡土壤最大持水量分别提高 11.62%,8.07%,3.72%,土壤毛管持水量分别提高 1.07%,4.56%,−1.53%,土壤非毛管持水量分别提高 68.69%,27.02%,32.08%,说明采取植树造林措施后,土壤水源涵养功能得到有效提升,其中非毛管持水量的增加幅度最大,且以刺槐效果最佳。

2.3 土壤入渗性能

2.3.1 土壤入渗过程 土壤入渗性能是反映土壤涵养水源功能的重要指标<sup>[6]</sup>。由图 2 可知,随着入渗时

间的增加,入渗速率逐渐减小,最终趋于稳定,但 4 个样地入渗过程的衰减程度不同。刺槐、柳树、白蜡、对照样地初始入渗率依次为 12.50,8.85,11.55,6.25 mm/min,随后入渗速率降低,且 10 min 内下降幅度较大,10 min 入渗率依次为 7.21,5.89,7.56,4.01 mm/min,与初始入渗率相比分别降低了 42.32%,33.45%,34.55%,35.84%,其中以刺槐林地下降最为明显,尤其是 0~6 min 内。10~40 min 内,刺槐、柳树、白蜡、对照样地入渗率由 7.21,5.89,7.56,4.01 mm/min 分别下降至 5.12,3.24,4.52,1.25 mm/min,下降幅度依次为 28.99%,44.99%,40.21%,68.83%,对照样地下降幅度最大。刺槐、柳树、白蜡、对照样地平均入渗率依次为 6.52,4.70,6.50,2.73 mm/min。各个样地在 60 min 左右达到稳定入渗阶段,刺槐、柳树、白蜡、对照样地稳定入渗率依次为 4.91,2.89,4.05,1.02 mm/min,表现为刺槐>白蜡>柳树>对照,与对照相比分别提高 381.37%,183.33%,297.06%,说明采取造林措施可以有效提高土壤入渗性能。从入渗性能可以看出,刺槐林地土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率最高,说明土壤入渗性能最好;白蜡和柳树土壤渗透性能次之,对照土壤渗透性能最差。对比 4 个样地可知,刺槐、柳树、白蜡 3 个样地植物根系发达,地表存在一定厚度的枯落物,土壤有机质含量高、土壤结构较好、非毛管孔隙度较高,这都会对土壤入渗过程产生一定影响。

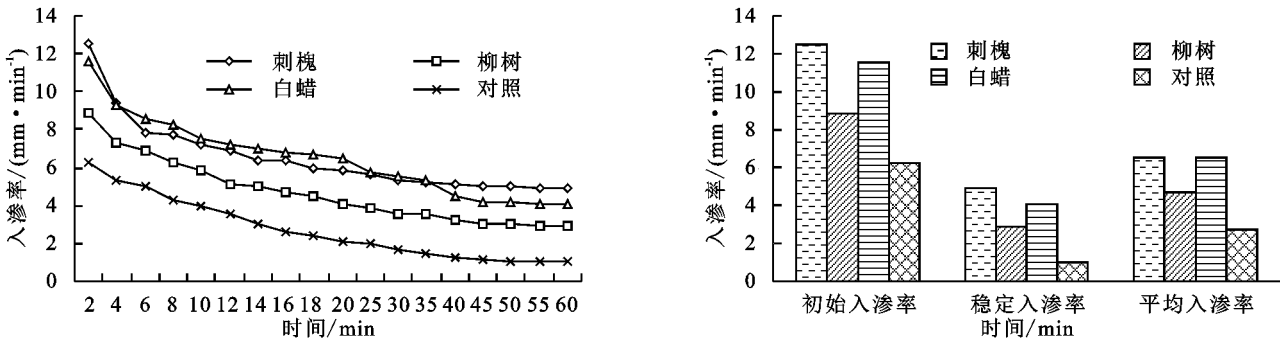


图 2 各样地土壤水分入渗过程和指标

Fig. 2 Process and indicators of soil water infiltration with different sample plots

2.3.2 土壤入渗模型 采用 Horton 模型、通用经验模型、Kostiakov 模型、Philip 模型 4 种入渗模型对土壤入渗过程进行优化拟合,其回归结果见表 3。Horton 模型的确定系数  $R^2$  为 0.957~0.995,平均值为 0.975;通用经验模型的确定系数  $R^2$  为 0.968~0.978,平均值为 0.973;Kostiakov 模型的确定系数  $R^2$  为 0.910~0.978,平均值为 0.956;Philip 模型的确定系数  $R^2$  为 0.910~0.992,平均值为 0.946。4 个入渗模型的拟合优度表现为 Horton 模型>通用经验模型>Kostiakov 模型>Philip 模型,说明 Horton 模型适用性最好,通用经验模型和 Kostiakov 模型次之,Philip 模型最差。Horton 模型和通

用经验模型为经验性模型,其参数因子较多、且 3 个参数因子有实测数据<sup>[15]</sup>,能更好地模拟研究区土壤入渗过程,这也解释了这两个模型拟合优度较高的原因。从模型形式上,Horton 模型和通用经验模型增加了参数因子  $a$  的限定,以反映无限长时在重力作用下达到了稳定入渗<sup>[11]</sup>,进而增强模型的拟合优度。Horton 模型模型参数因子  $a$  数值大小表现为刺槐>白蜡>柳树>对照,这与稳定入渗率的变化规律相一致,且数值上较为接近。参数因子  $k$  反映了土壤入渗的衰减速度,数值越大,其衰减速度越快。4 个样地  $k$  值表现为刺槐>白蜡>对照>柳树,说明刺槐林地土壤入渗可以更早进入

稳定阶段,这与该样地土壤结构特征、植被恢复等有关。对于通用经验模型,刺槐、柳树、白蜡、对对照样地的参数因子  $a$  依次为 3.761,0.615,2.274,0.203,这与 4 个样地稳定入渗率的变化规律相一致,但其数值偏低。参数因子  $n$  也可以反映土壤入渗的衰减速度,刺槐林地参数因子  $n$  最大,为 0.606,这与 Horton 模型拟合结果相一致。Kostiakov 模型为经验性模型,没有明确物理基础,能够获得准确的入渗过程。由该模型可知,当入渗时间为 0 时,入渗率为 $\infty$ ;当入渗时间为 $\infty$ 时,入渗率为 0。表明该模型在短时间范围内具有一定的适用性,但对于长时间入渗过程,该模型具有一

定的局限性。Kostiakov 模型有两个参数因子<sup>[16]</sup>, $a$  为经验入渗系数,反映了初始入渗速率,其数值大小表现为刺槐>白蜡>柳树>对照,这与初始入渗率的变化规律相一致; $b$  为经验入渗指数,反映了土壤入渗的衰减程度,其数值大小表现为对照>柳树>白蜡>刺槐。Philip 模型是半经验半理论模型,具有明确的物理意义,且公式形式简单,仅有两个参数因子<sup>[17]</sup>;但该模型具有局限性,模型中幂指数为-0.5,是一个固定的常数<sup>[12]</sup>,导致模型拟合受土壤物理性质的影响较大,尤其是土壤含水率,进而降低模型拟合优度,这也解释其拟合效果较差的原因。

表 3 各样地土壤入渗模型拟合参数  
Table 3 Fitting parameters of soil infiltration models with different sample plots

样地	Horton 模型			通用经验模型				Kostiakov 模型			Philip 模型			
	$a$	$b$	$k$	$R^2$	$a$	$b$	$n$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$s$	$a$	$R^2$
刺槐	5.227	9.112	0.162	0.957	3.761	13.204	0.606	0.975	14.269	0.286	0.965	12.889	3.071	0.992
柳树	2.969	6.610	0.085	0.991	0.615	11.094	0.342	0.970	11.758	0.336	0.978	11.308	1.679	0.951
白蜡	4.031	7.401	0.063	0.959	2.274	13.119	0.401	0.968	14.103	0.292	0.970	13.317	2.937	0.930
对照	0.961	6.175	0.077	0.995	0.203	9.465	0.490	0.978	9.953	0.482	0.910	10.554	-0.089	0.910

2.4 土壤水源涵养功能评价

由表 4 可知,主成分分析可将 7 个评价指标通过降维处理后得到两个主成分( $F_1, F_2$ ),其特征根和贡献率分别为 4.487,2.506 和 64.096%,35.800%,累计贡献率高达 99.896%,说明这两个主成分可以较好地解释总方差,信息损失量非常少;两个主成分的特征根均大于 1,说明这两个主成分合理有效,可以用于评价不同植被类型土壤水源涵养功能。两个主成分的影响程度为主成分 1>主成分 2,其中主成分 1 几乎全部评价指标都可以反映变异信息,主成分 2 中毛管持水量、初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率可以较好地反映变异信息,占主导地位。

表 5 为未旋转的主成分矩阵,主成分 1 各评价指

标数值为 0.535~0.953(绝对值),主成分 2 各评价指标数值为 0.302~0.845(绝对值);将表中各评价指标数值与对应主成分特征根的算术平方根相除,即可得到两个主成分各评价指标的特征向量,从而确定两个主成分表达式。

表 4 不同植被类型土壤水源涵养功能评价总方差  
Table 4 Total variance of soil water conservation function evaluation with different vegetation types

主成分	未旋转平方和载入			旋转平方和载入		
	特征根	贡献率/ %	累计 贡献率/%	特征根	贡献率/ %	累计 贡献率/%
1	4.487	64.096	64.096	4.487	64.096	64.096
2	2.506	35.800	99.896	2.506	35.800	99.896

表 5 水源涵养功能评价未旋转的主成分矩阵

Table 5 Unrotated principal component matrix for evaluation of water source conservation function

评价 指标	土壤容重 ( $C_1$ )	最大持水量 ( $C_2$ )	毛管持水量 ( $C_3$ )	非毛管 持水量( $C_4$ )	初渗 入渗率( $C_5$ )	稳定 入渗率( $C_6$ )	平均 入渗率( $C_7$ )
主成分	$F_1$	-0.953	0.953	-0.834	0.888	0.649	0.692
	$F_2$	0.302	-0.302	0.550	-0.460	0.759	0.721

两个主成分表达式为:

$$F_1 = -0.450C_1 + 0.450C_2 - 0.394C_3 + 0.419C_4 + 0.306C_5 + 0.326C_6 + 0.252C_7$$
 (1)

$$F_2 = 0.191C_1 - 0.191C_2 + 0.348C_3 - 0.290C_4 + 0.479C_5 + 0.455C_6 + 0.534C_7$$
 (2)

表 6 为不同植被类型土壤水源涵养功能主成分得分和综合排序。由表 6 可知,4 个样地主成分 1 得分大小依次为刺槐>柳树>白蜡>对照,刺槐最高,

为 3.149。因此,根据主成分 1 的计算结果,研究区刺槐林地水源涵养功能最佳。4 个样地主成分 2 得分大小依次为白蜡>刺槐>柳树>对照,白蜡最高,为 2.005。因此,根据主成分 2 的计算结果,研究区白蜡林地水源涵养功能最佳。造成两个主成分水源涵养功能排序差异的主要原因是两个主成分主导地位的评价指标不同,主成分 1 侧重于土壤容重和持水能力等土壤物理性质,而主成分 2 则侧重于土壤入渗指标。由综合得分及

排序可知,刺槐、柳树、白蜡、对照综合得分依次为 2.010, -0.459, -0.050, -1.501,其排序为刺槐>白蜡>柳树>对照。无论是主成分得分还是综合得分,对照水源涵养功能均最差,刺槐、柳树、白蜡的水源涵养功能均优于对照样地,说明黄河三角洲采取植树造林措施后,土壤结构、持水能力、渗透性能均有所改善,从综合评价结果来看,刺槐林最好,白蜡林次之,柳树林最差。因此,从蓄水保土、涵养水源角度,可在研究区及与其生境类似的区域优先考虑刺槐树种。

表 6 主成分得分和综合排序

Table 6 Principal component score and comprehensive sorting

样地	$F_1$ 得分	排序	$F_2$ 得分	排序	综合 得分	综合 排序
刺槐	3.149	1	-0.028	2	2.010	1
柳树	-0.655	2	-0.109	3	-0.459	3
白蜡	-1.198	3	2.005	1	-0.050	2
对照	-1.296	4	-1.867	4	-1.501	4

3 讨论

3.1 植被类型对土壤孔隙结构的影响

黄河三角洲地区地下水矿化度较高,土壤质地以粉砂和细砂为主,土壤盐渍化普遍存在,已严重限制区域生态系统可持续发展<sup>[18]</sup>,在该区域开展生态环境保护可为黄河流域高质量发展提供科技支撑<sup>[19]</sup>。植被恢复措施可以有效地改善区域生态环境和土壤质量,是盐碱地绿色改良的主要生态修复措施<sup>[20]</sup>。刘艳丽等<sup>[21]</sup>研究认为植被恢复措施可以降低黄河三角洲盐碱地土壤容重,增加土壤孔隙度、土壤团聚体稳定性、持水能力、土壤有机碳等土壤理化指标。从本研究上看,与对照相比,刺槐、柳树、白蜡 0—30 cm 土层土壤容重分别降低了 11.11%,7.64%,3.47%,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度分别是对照样地的 1.04~1.12,0.98~1.05,1.27~1.69 倍,呈显著性增加或减小( $p<0.05$ ),其持水能力也表现为有林地显著大于对照( $p<0.05$ ),这与赵振磊等<sup>[22]</sup>研究的不同刺槐混交林地对盐碱地土壤持水能力的研究结果相一致。

3.2 植被类型对土壤入渗特征的影响

相关研究表明,不同植被类型对黄河三角洲滩地土壤入渗性能的改善效应不同,不仅与植被类型、根系分布特征有关,而且还与植被措施对土壤结构的改良效果有关<sup>[23]</sup>。许景伟等<sup>[24]</sup>通过不同林分类型土壤入渗性能研究表明,有林地土壤稳定入渗率是无林地的 2.3~4.3 倍,表明不同林地均具有提高土壤入渗性能的效应。本研究结果表明,对照样地土壤

稳定入渗速率为 1.02 mm/min,3 种植被类型土壤稳定入渗速率表现为刺槐>白蜡>柳树,分别是对照的 4.81,3.97,2.83 倍,说明植被措施可以显著提高土壤入渗性能,且提升效果优于许景伟等<sup>[24]</sup>研究结果。这是由于土壤入渗特性具有明显的地区域性,不仅与研究区域的土壤质地、孔隙结构、水分含量有关,而且还与土地利用类型、林分组成、林龄、根系分布特征以及植被措施对土壤性质的改良效应等关系密切。

3.3 研究展望

黄河三角洲土壤盐渍化严重、土壤贫瘠,严重限制了植被的生长发育和分布格局<sup>[25]</sup>。采取造林措施后,滩地土壤结构和性质发生改变,进而引起土壤持水能力和入渗性能的变化。本研究结果表明刺槐林地在水源涵养功能方面具有较好的改良效果,且该树种是黄河三角洲盐碱地的主要防护林树种,但由于林地蒸降比较大、淡水资源缺乏及土壤盐碱化,刺槐林已呈现退化现象,固氮作用和改良土壤效应在逐渐减弱<sup>[26]</sup>,作为主要树种的弊端也逐渐呈现出来;同时,本文仅研究刺槐、白蜡、柳树 3 种单一树种的土壤水源涵养功能,其林分结构单一且生态系统稳定性较差。因此,今后应加强黄河三角洲不同林分组成、不同林龄、不同造林模式等混合林地水源涵养功能、土壤养分以及土壤酶活性等方面研究。

4 结论

(1) 随着土层深度的增大,4 个样地土壤容重均显著增大,土壤总孔隙度显著降低。与对照样地相比,刺槐、柳树、白蜡样地土壤容重显著降低,土壤总孔隙度显著增大,而土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度无显著差异。采取造林措施可以显著改善土壤结构,调节土壤蓄水、透水能力,尤其以刺槐效果最佳。

(2) 与对照样地相比,黄河三角洲有林地最大持水量和非毛管持水量显著提高,采取植树造林措施后土壤水源涵养功能得到有效提升。刺槐、柳树、白蜡、对照样地 0—30 cm 土层土壤最大持水量依次为 517.50,501.00,480.87,463.61 t/hm<sup>2</sup>,4 个样地均差异显著。

(3) 刺槐、柳树、白蜡样地稳定入渗率依次为 4.91,2.89,4.05 mm/min,与对照(1.02 mm/min)相比分别提高 381.37%,183.33%,297.06%,说明采取造林措施可以有效提高土壤入渗性能。黄河三角洲不同植被类型土壤入渗过程拟合模型的拟合优度以 Horton 模型最佳,通用经验模型和 Kostiakov 模型次之,Philip 模型最差。

(4) 主成分分析结果表明,7 个评价指标通过降维处理后得到两个主成分,累计贡献率高达 99.896%,信息



损失量非常少。黄河三角洲4个样地土壤水源涵养功能表现为刺槐>白蜡>柳树>对照,3种植被类型土壤水源涵养功能优于对照样地,且刺槐林地在土壤结构、持水能力、入渗性能等方面均好于柳树林地和白蜡林地。从蓄水保土、涵养水源角度,可在研究区及与其生境类似的区域优先考虑刺槐树种。

#### 参考文献:

- [1] Biao Z, Wenhua L, Gaodi X, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2010,69(7):1416-1426.
- [2] 赵筱青,和春兰,易琦.大面积桉树引种区土壤水分及水源涵养性能研究[J].水土保持学报,2012,26(3):205-210.  
Zhao X Q, He C L, Yi Q. Soil moisture and water conservation in *Eucalyptus uraphylla* spp. introduction mountain area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(3):205-210.
- [3] 陈严武,史正涛,曾建军,等.水源林不同林分水源涵养功能评价[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):67-74.  
Chen Y W, Shi Z T, Zeng J J, et al. The evaluation on the soil water conservation function of five types forests in urban water source region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(2):67-74.
- [4] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J].生态学报,2012,32(2):538-547.  
Pan C X, Li Y Y, Peng Y, et al. Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(2):538-547.
- [5] 艾彪,黄云,朱元皓,等.赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2021,41(1):197-205.  
Ai B, Huang Y, Zhu Y H, et al. Evaluation of water conservation capacity of litter and soil layer in typical forest stands in hilly region of Southern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):197-205.
- [6] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2010,30(15):4162-4172.  
Zhao Y Y, Wang Y J, Wang Y Q, et al. Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(15):4162-4172.
- [7] 赵建生,王永明,杨新兵.冀北山地森林土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2013,20(3):201-205.  
Zhao J S, Wang Y M, Yang X B. Hydrological effects of forset soil in mountain area of Northern Hebei [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(3):201-205.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所.土壤物理分析[M].北京:科学出版社,1978.  
Nanjing Institute of Soil Research, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical Analysis [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [9] 温林生,邓文平,钟流,等.江西省公益林枯落物层和土壤层水源涵养功能评价[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(3):35-43.  
Wen L S, Deng W P, Zhong L, et al. Evaluation of water conservation function of litter layer and soil layer of public welfare forests in different soil texture types in Jiangxi province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(3):35-43.
- [10] 杜建会,方政,林志斌.广州市典型绿地土壤水分入渗特征[J].生态学报,2021,41(24):9869-9877.  
Du J H, Fang Z, Lin Z B. Soil infiltration characteristics of typical green space in Guangzhou City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(24):9869-9877.
- [11] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷3种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J].生态学报,2011,31(8):2331-2340.  
Liu J, Li X W, Ji Z H, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(8):2331-2340.
- [12] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等.小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报,2004,18(6):1-5.  
Liu X, Zhang G C, Li X L, et al. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(6):1-5.
- [13] 兰道云,毕华兴,赵丹阳,等.晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价[J].水土保持学报,2022,36(2):189-196.  
Lan D Y, Bi H X, Zhao D Y, et al. Evaluation on soil conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities in the loess area of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):189-196.
- [14] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363,371.  
Hou G Y, Bi H X, Wei X, et al. Water conservation function of litters and soil in three kinds of woodlands in gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):357-363,371.
- [15] 朱列坤,戴全厚,李焱秋,等.喀斯特浅层裂隙土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(2):47-54.  
Zhu L K, Dai Q H, Li Y Q, et al. Infiltration charac-



- teristics and influencing factors of Karst shallow fissured soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):47-54.
- [16] 李春茂,徐勤学,吴攀,等.不同土地利用方式峰丛坡地土壤入渗特征及其模拟[J].水土保持研究,2019,26(1):47-52,60.  
Li C M, Xu Q X, Wu P, et al. Simulation analysis on soil infiltration under different land use in Karst hillsides[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):47-52,60.
- [17] 沈婧,樊贵盛.基于改进 BP 神经网络的水分入渗参数预测模型[J].人民黄河,2017,39(8):137-142.  
Shen J, Fan G S. Saline-alkali soil water infiltration parameter prediction model based on improved BP neural network[J]. Yellow River, 2017,39(8):137-142.
- [18] 乔艳辉,王月海,姜福成,等.黄河三角洲盐碱地衰退林分的更替改造模式[J].水土保持通报,2019,39(4):107-113,119.  
Qiao Y H, Wang Y H, Jiang F C, et al. Replacement and transformation modes of degraded forest stand in saline land of Yellow River Delta[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):107-113,119.
- [19] 方创琳,王振波,刘海猛.美丽中国建设的理论基础与评估方案探索[J].地理学报,2019,74(4):619-632.  
Fang C L, Wang Z B, Liu H M. Exploration on the theoretical basis and evaluation plan of Beautiful China construction[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(4):619-632.
- [20] 孙佳,夏江宝,苏丽,等.黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应[J].应用生态学报,2020,31(4):1323-1332.  
Sun J, Xia J B, Su L, et al. Soil amelioration of different vegetation types in saline-alkali land of the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(4):1323-1332.
- [21] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等.不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5183-5190.  
Liu Y L, Li C L, Gao M X, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5183-5190.
- [22] 赵振磊,李传荣,许景伟,等.黄河三角洲不同刺槐混交林的土壤持水能力[J].水土保持学报,2012,26(3):222-226.  
Zhao Z L, Li C R, Xu J W, et al. Soil water-holding ability in different mixed black locust plantations in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(3):222-226.
- [23] 李永涛,魏海霞,王振猛,等.黄河三角洲不同林分类型对土壤水分物理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(8):106-112.  
Li Y T, Wei H X, Wang Z M, et al. Effects of different forest stands on soil water physical properties of saline-alkali land in the Yellow River Delta[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020,40(8):106-112.
- [24] 许景伟,李传荣,夏江宝,等.黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J].水土保持学报,2009,23(1):173-176.  
Xu J W, Li C R, Xia J B, et al. Soil hydrological properties of different forest types in lowlands of the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(1):173-176.
- [25] Liu S L, Hou X Y, Yang M, et al. Factors driving the relationships between vegetation and soil properties in the Yellow River Delta, China[J]. Catena, 2018,165:279-285.
- [26] 马风云,白世红,侯本栋,等.黄河三角洲退化人工刺槐林地土壤特征[J].中国水土保持科学,2010,8(2):74-79.  
Ma F Y, Bai S H, Hou B D, et al. Soil properties of degraded *Robinia pseudoacacia* plantation in Yellow River Delta[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010,8(2):74-79.
- ~~~~~
- (上接第 254 页)
- [31] Li X Y, Li Y, Chen A P, et al. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,269:239-248.
- [32] 杨少康,刘冀,魏榕,等.长江上游流域生长季植被覆盖度时空变化特征及其成因[J].长江流域资源与环境,2022,31(7):1523-1533.  
Yang S K, Liu J, Wei R, et al. Spatio-temporal variation characteristics and causes of vegetation coverage in growing season in the upper reaches of the Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(7):1523-1533.
- [33] 何清芸,牟风云,李秋彦,等.重庆植被覆盖度时空演变及驱动力地理学探究[J].科学技术与工程,2021,21(28):11955-11962.  
He Q Y, M F Y, Li Q Y, et al. Geography study on spatiotemporal evolution of fractional vegetation coverage and the driving forces in Chongqing[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(28):11955-11962.