

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.032 CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.032

秦子怡,戴翠婷,敖利满,等.三峡库区典型退耕模式对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2025,39(6):118-126.

QIN Ziyi, DAI Cuiting, AO Liman, et al. Effects of typical farmland conversion modes on soil hydraulic properties in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):118-126.

三峡库区典型退耕模式对土壤水力特性的影响

秦子怡¹, 戴翠婷², 敖利满¹, 杜映妮¹, 汪运东¹, 李朝霞¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 湖南省农业科学院, 长沙 410125)

摘要: [目的] 通过探究三峡库区不同退耕模式对土壤水力特性的影响, 为三峡库区的林草生态工程提供科学依据。[方法] 以耕地为对照, 选取三峡库区典型退耕模式(退耕还草、退耕还林、退耕还果)为研究对象, 测定0~20、20~40 cm的土壤基本理化性质、孔隙分布特征和水力参数, 分析不同退耕模式下的土壤水力特性差异及其影响因素。[结果] 1) 不同退耕模式均显著降低土壤体积质量, 其大小分别为耕地(1.52 g/cm³) > 退耕还果(1.48 g/cm³) > 退耕还草(1.41 g/cm³) > 退耕还林(1.35 g/cm³); 仅退耕还林显著增加土壤有机质质量分数, 相对耕地土壤有机质质量分数显著提升65.22%。2) 不同退耕模式主要增加土壤的中孔率和大孔率, 相较于耕地, 退耕还草、退耕还林和退耕还果后的土壤中孔率分别增加76.61%、59.38%和14.91%, 大孔率分别增加23.98%、43.23%和15.66%。3) 不同退耕模式均能有效提升土壤导水能力, 其中退耕还林及退耕还果还能有效提升0~40 cm土层土壤持水能力, 而退耕还草并不利于0~20 cm土层土壤持水。4) 在三峡库区典型退耕模式下, 土壤孔隙率、体积质量、有机质质量分数、粉粒含量是引起土壤水力特性变异的主要因子。[结论] 在三峡库区可因地制宜地推广退耕还果模式以实现生态效益与经济效益的双赢。

关键词: 三峡库区; 退耕模式; 土壤基本理化性质; 孔隙分布特征; 土壤水力特性

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0118-09

Effects of Typical Farmland Conversion Modes on Soil Hydraulic Properties in Three Gorges Reservoir Area

QIN Ziyi¹, DAI Cuiting², AO Liman¹, DU Yingni¹, WANG Yundong¹, LI Zhaoxia¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different farmland conversion modes on soil hydraulic properties in the Three Gorges Reservoir area, thereby providing scientific guidance for the forest and grassland ecological projects in this area. [Methods] With farmland as the control, typical farmland conversion modes (farmland-to-grassland conversion, farmland-to-forest conversion, farmland-to-orchard conversion) in the Three Gorges Reservoir area were selected as the research objects. The basic physicochemical properties of soil, pore distribution characteristics, and hydraulic parameters were measured at 0–20 cm and 20–40 cm depths. Differences in soil hydraulic properties and their influencing factors under different farmland conversion modes were analyzed. [Results] 1) All farmland conversion modes significantly reduced the soil bulk density, with values ranking as follows: farmland (1.52 g/cm³) > farmland-to-orchard conversion (1.48 g/cm³) > farmland-to-grassland conversion (1.41 g/cm³) > farmland-to-forest conversion (1.35 g/cm³). Only farmland-to-forest conversion significantly increased the soil organic matter content, showing a 65.22% increase compared to that of farmland. 2) Different farmland conversion modes mainly increased soil mesoporosity and macroporosity. Compared to

收稿日期: 2025-06-03 修回日期: 2025-07-15 录用日期: 2025-07-25 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(42377328, 42077065)

第一作者: 秦子怡(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与土壤物理研究。E-mail: 2019538835@qq.com

通信作者: 李朝霞(1976—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: zqli@mail.hzau.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

farmland, farmland-to-grassland conversion, farmland-to-forest conversion, farmland-to-orchard conversion increased soil mesoporosity by 76.61%, 59.38%, and 14.91%, and macroporosity by 23.98%, 43.23%, and 15.66%, respectively. 3) Different farmland conversion modes effectively enhanced soil hydraulic conductivity, among which farmland-to-forest conversion and farmland-to-orchard conversion could also effectively improve the water holding capacity in the 0–40 cm soil, while farmland-to-grassland conversion was not conducive to the water holding capacity in the 0–20 cm soil. 4) Under the typical farmland conversion modes in Three Gorges Reservoir area, soil porosity, bulk density, organic matter content, and silt content were the main factors driving the variations of soil hydraulic properties. [Conclusion] In the Three Gorges Reservoir area, the farmland-to-orchard conversion can be promoted according to local conditions to realize a win-win situation of ecological and economic benefits.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; farmland conversion modes; basic physicochemical properties of soil; pore distribution characteristics; soil hydraulic properties

Received: 2025-06-03

Revised: 2025-07-15

Accepted: 2025-07-25

Online(www.cnki.net): 2025-09-26

三峡库区作为我国重要的水土保持功能区和长江上游关键水源涵养地,其生态安全直接关系到长江流域的水资源安全和区域可持续发展。然而,该区域受复杂地形、集中强降雨及长期不合理土地利用(如陡坡开垦、过度耕作等)的多重影响,普遍存在坡耕地退化、水土流失加剧及农业面源污染等生态环境问题,严重威胁库区生态安全和水质安全^[1]。为此,近30 a来,三峡库区大力开展退耕还林还草生态工程,在植被恢复方面取得显著成效,大大增强土壤水源涵养功能^[2]。土壤水力特性表征土壤的导水和持水性能,是陆地生态系统水分循环的关键调控要素,直接影响土壤水源涵养、养分运移和植被生长等生态功能^[3]。因此,研究退耕还林还草对土壤水力特性的影响机制,对三峡库区水土保持、水资源管理和生态恢复工作具有关键指导价值。

目前国内外学者对退耕还林还草的土壤水力特性进行了大量研究。已有研究^[4]表明,退耕还林还草通过植被根系对土壤结构的物理改良作用(如根系穿插、团聚体形成)及凋落物输入带来的有机质积累,显著改变土壤孔隙结构和水分运移路径,进而影响土壤水力特性,且不同的退耕模式对土壤水力特性的影响机制不同^[5]。其中退耕还草可以通过提高土壤有机质含量、孔隙度和黏粒含量从而增加土壤饱和导水率和田间持水量^[6];退耕还林主要通过影响土壤体积质量、有机质、孔隙度和团聚体来改善土壤水力特性^[7];退耕还林导致土壤团聚体稳定性降低,且对土壤入渗能力及饱和导水率的改善作用有限^[8]。受区域气候、成土过程及植被类型的影响,各地区的典型退耕模式对土壤水力性质的影响程度和关键影响因素存在明显差异。在黄土高原地区,土壤水力特性在还林模式下较高,而其他退耕模式差异不

大^[9],而在喀斯特地区,还林模式与还草模式的水力特性没有显著差异^[10]。因此,有必要在不同地区开展关于退耕还林还草土壤水力性质的相关研究,以更深刻地理解不同退耕模式对土壤水力性质的影响机制。

三峡库区具有山地地形陡峭、强降水事件频发、农业生产活动强度高、土层浅薄且砾石含量高等独特的地理与人为活动特征,退耕模式对土壤水力特性的影响可能存在区域差异性。为兼顾库区农业经济效益和生态效益,退耕还果园成为重要的退耕模式之一。目前,库区内退耕还林还草模式对土壤侵蚀及养分流失的影响已得到充分研究^[11-12],且退耕还果显著影响土壤颗粒组成及土壤体积质量^[13]。但是库区不同退耕模式对土壤水力特性的影响研究仍显不足。因此,本文以三峡库区典型退耕模式的土壤为研究对象,通过对比长期退耕后土壤的基本理化性质、孔隙分布特征和水力特性,研究不同退耕模式对土壤水力特性的影响及其机制,在兼顾生态效益与经济效益的基础上,为三峡库区因地制宜的科学林草工程提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于三峡库区秭归县王家桥小流域(31°04'20"~31°15'07"N, 110°40'51"~110°47'13"E)。该流域属于长江二级支流,流域总面积达16.7 km²,属于典型的山区小流域,流域最高海拔1180 m,最低海拔184 m。该流域属亚热带湿润季风气候,雨量分布不均,夏季高温多雨,多年平均气温20℃,多年平均降水量1192 mm,无霜期310 d。强烈的侵蚀和割裂的地形导致小流域山高坡陡的地貌特征。流域内以紫砂岩发育的中性和石灰性紫色土为主,

土层浅薄,砾石含量高。为应对严重的土地退化问题,王家桥小流域自 20 世纪 90 年代末期以来,陆续实施退耕还林(天然次生林)、退耕还草和退耕还果(柑橘)等生态恢复工程,而耕地多玉米连作^[14]。

1.2 样点布设与土样采集

基于前期对研究区土地利用类型和退耕模式的调研与勘探,在研究区内选择 3 种长期退耕(20 a 以上)后的土地:草地、林地、果园,以耕地为对照,每种土地于研究区内随机布设 3 个重复样地,重复样地之间的距离控制在 2 km 以上以保证研究样地的试验结果具有区域代表性,研究样地概况见表 1。不同退耕

模式样地的成土母质均为紫砂岩,海拔、坡向和坡度等立地条件基本一致。于 2023 年 9 月下旬至 11 月中旬采集土壤样品,采样在保证前后 1 周无降雨时进行以排除降雨对土壤水力特性的干扰。由于研究样地土层浅薄,平均土层厚度不足 50 cm 且常规耕作对土壤的扰动主要集中在 0~20 cm 土层,故采样时选取 0~20、20~40 cm 土层进行分层采样。于 0~20、20~40 cm 土层分别采集 3 个原状土壤样品(100 cm³ 环刀)以测定土壤体积质量、含水量、砾石含量、饱和导水率及土壤水分特征曲线 SWRC;逐层采集 1 个扰动土壤样品,在风干过筛后用于土壤有机质含量和颗粒组成的测定。

表 1 研究样地概况

Table 1 Overview of the study sampling sites

退耕模式	海拔/m	坡向	坡度/(°)	植被覆盖度/%	主要植被	土层厚度/cm	施肥管理
耕地	481	阳坡	8	25	玉米(<i>Zea mays</i> L.)	31~50	矿物质化肥氮磷钾和有机肥(猪粪)配施
退耕还草	490	阳坡	8	70	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)等	35~47	无
退耕还林	504	阳坡	10	80	柏树(<i>Cupressus funebris</i>)、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)等	38~49	无
退耕还果	452	阳坡	10	55	柑橘(<i>Citrus reticulata</i> Blanco)	40~55	矿物质化肥氮磷钾和有机肥配施

1.3 土壤理化性质的测定

土壤体积质量采用环刀法测定;土壤砾石体积分数采用排水法测定;土壤有机质采用重铬酸钾消煮法测定;土壤颗粒组成采用吸管法测定;土壤饱和含水量、毛管含水量采用烘干法测定;土壤饱和导水率采用定水头法测定,具体方法参照文献[15]。

1.4 水分特征曲线及相关参数的计算

1.4.1 土壤水分特征曲线测定及拟合 土壤水分特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)采用离心机法测得,分别测定土壤吸力为 0、2.5、5、10、20、33、100、200、500、1 000、1 500 kPa 时的土壤含水量并绘制水分特征曲线。运用 van Genuchten 模型(VG 模型)^[16]对测得的土壤水分特征曲线进行拟合,得到模型参数,计算式为:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + |\alpha h|^n]^{-m} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水量, cm³/cm³; θ_r 为土壤残余体积含水量, cm³/cm³; θ_s 为土壤饱和体积含水量, cm³/cm³; h 为土壤水势, cm; α 为进气值倒数; m 、 n 为形状参数, $m = 1 - 1/n$ 。

土壤水分特征曲线中 33 kPa 吸力下的土壤含水量作为土壤田间持水量, cm³/cm³。

1.4.2 土壤当量孔径计算 土壤当量孔径(d , μm)可由毛管理论方程^[17]计算:

$$d = \frac{4\gamma \cos \omega}{\rho_w g h} \quad (2)$$

式中: γ 为水的表面张力系数, 20 °C 时一般取 72.8 × 10⁻⁵ N/cm; ρ_w 为水的密度, 取值 0.998 g/cm³; g 为重力加速度, 取值 980 cm/s²; ω 为水孔接触角, 一般取 0。因此, 当量孔径(d)与土壤水势(h)的关系可用 $d = 2980/h$ 表示^[17]。根据土壤水势范围可将土壤孔隙大致划分为大孔($d > 80 \mu\text{m}$)、中孔($30 \mu\text{m} < d < 80 \mu\text{m}$)和微孔($d < 30 \mu\text{m}$) 3 种^[18]。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2019 软件对试验数据进行整理;采用 SPSS 27.0 软件对数据进行方差分析和 Pearson 相关分析, 显著性阈值设定为 $p \leq 0.05$; 采用 Origin 2021 软件绘图;采用 RETC 软件对土壤水分特征曲线进行拟合;采用 Canoco 5.0 软件对数据进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同退耕模式下的土壤理化性质

不同退耕模式下各土层的土壤理化性质见表 2。不同退耕模式均可以显著降低土壤体积质量($p < 0.05$), 退耕还草、退耕还林和退耕还果后 0~20 cm 土壤体积质量分别较耕地显著低约 10.07%、17.45% 和 4.03%, 20~40 cm 土壤体积质量分别较耕地低约 4.52%、5.16% 和 1.29%。退耕还林还可以显著提升

土壤有机质质量分数($p < 0.05$),退耕还林后 0~20、20~40 cm 土壤平均有机质质量分数分别较耕地显著高 83.98% 和 40.62%。退耕还草及退耕还果并不能显著提升土壤有机质质量分数,还草及还果后的土壤有机质质量分数与耕地相比均无显著差异。不同

退耕模式对 0~20 cm 土壤的颗粒组成无显著影响,但 20~40 cm 土壤的砂粒和粉粒占比发生显著变化。退耕还草、还林及还果后 20~40 cm 的土壤砂粒占比分别显著提升 34.59%、34.14% 和 29.27%,土壤粉粒占比分别显著降低 30.95%、30.72% 和 41.51%。

表 2 不同退耕模式下的土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties under different farmland conversion modes

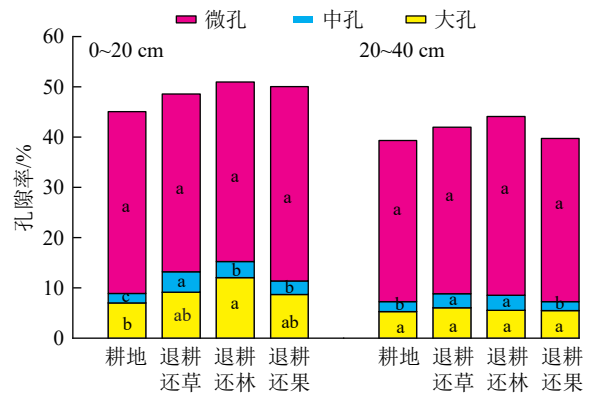
土层深度/cm	退耕模式	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	体积质量/($g \cdot cm^{-3}$)	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	砾石/%
0~20	耕地	19.45±5.57Aa	33.79±5.54Aa	46.76±7.22Aa	1.49±0.06Ba	14.48±1.53Abc	17.34±7.46Ab
	退耕还草	18.04±2.43Aa	32.58±7.08Aa	49.38±7.60Ba	1.34±0.06Bc	11.91±3.31Ac	20.72±12.89Aab
	退耕还林	17.79±5.60Aa	35.48±6.48Aa	46.73±2.95Ba	1.23±0.06Bd	26.64±7.63Aa	14.45±4.44Bb
	退耕还果	21.19±3.34Aa	29.83±11.32Aa	48.99±14.06Aa	1.43±0.04Bb	18.18±7.08Ab	21.37±1.10Aab
20~40	耕地	18.74±7.89Aab	38.93±6.31Aa	42.33±13.96Ab	1.55±0.03Aa	10.93±3.02Bb	23.47±10.89Ab
	退耕还草	16.16±4.03Ab	26.88±3.56Bb	56.97±2.27Aa	1.48±0.07Ab	8.36±1.44Bb	25.14±13.54Ab
	退耕还林	16.25±3.11Ab	26.97±3.88Bb	56.78±6.61Aa	1.47±0.11Ab	15.37±3.59Ba	26.87±4.35Ab
	退耕还果	22.51±3.72Aa	22.77±4.70Ab	54.72±8.23Aa	1.53±0.05Aab	8.65±4.26Bb	27.10±1.40Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同的大写字母和小写字母分别表示同一退耕模式不同土层之间和同一土层不同退耕模式间差异显著($p < 0.05$)。

不同退耕模式下的土壤有机质质量分数均表现为 0~20 cm 显著高于 20~40 cm,而体积质量则反之($p < 0.05$)。相较于 0~20 cm 土壤,耕地、退耕还草、退耕还林和退耕还果模式下 20~40 cm 土壤的有机质质量分数分别显著降低 24.52%、29.81%、42.30% 和 52.42%,体积质量分别显著提高 4.03%、10.45%、19.51% 和 6.99%。还林模式下 20~40 cm 土壤的砾石体积分数较 0~20 cm 土壤显著高约 85.95%。还草和还林模式下的砂粒占比均表现为 20~40 cm 土壤显著高于 0~20 cm 土壤,粉粒占比则反之($p < 0.05$),而不同退耕模式土壤的黏粒占比在不同土层之间均未表现出显著差异。

2.2 不同退耕模式下的土壤孔隙分布

退耕主要改变土壤的中孔率和大孔率(图 1),对土壤微孔率无显著影响。退耕还林能够显著提升 0~40 cm 土层土壤中孔率及 0~20 cm 土层土壤大孔率,退耕还草能够显著提升 0~40 cm 土层土壤中孔率,退耕还果能够显著提升 0~20 cm 土层土壤中孔率,不同退耕模式间的土壤微孔率并未显示出显著差异($p < 0.05$)。对于 0~20 cm 土层土壤,还草、还林及还果后的中孔率分别较耕地显著高 114.21%、69.47% 和 41.48%,还林后的大孔率较耕地显著高 122.46%,总孔隙度表现为退耕还林>退耕还果>退耕还草>耕地。对于 20~40 cm 土层土壤,退耕还草和退耕还林均能显著提升土壤中孔率,还草和还林后的土壤中孔率分别较耕地显著高 40.70% 和 49.75%,总孔隙度表现为退耕还林>退耕还草>退耕还果>耕地。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同退耕模式之间在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

图 1 不同退耕模式下的土壤孔隙分布

Fig. 1 Soil pore distribution under different farmland conversion modes

2.3 不同退耕模式下的土壤水力特性

2.3.1 不同退耕模式下的土壤水分特征曲线 土壤水分特征曲线能够反映土壤水力特性,对研究土壤水分的可利用性、持水性等具有重要作用。通过对比土壤水分特征曲线中多个相同土壤水基质势下的土壤体积含水量可以得出,对于 0~20 cm 土层,退耕还林和退耕还果均能有效提升土壤平均体积含水量,相对于耕地,还林和还果模式下的水分特征曲线上移,退耕还林和退耕还果后的土壤体积含水量增量平均值分别为 12.44% 和 14.98% (图 2a)。对于 20~40 cm 土层,不同的退耕模式均能提升土壤平均体积含水量,还草、还林和还果后的土壤体积含水量增量平均值分别为 2.86%、7.32% 和 7.75% (图 2b)。

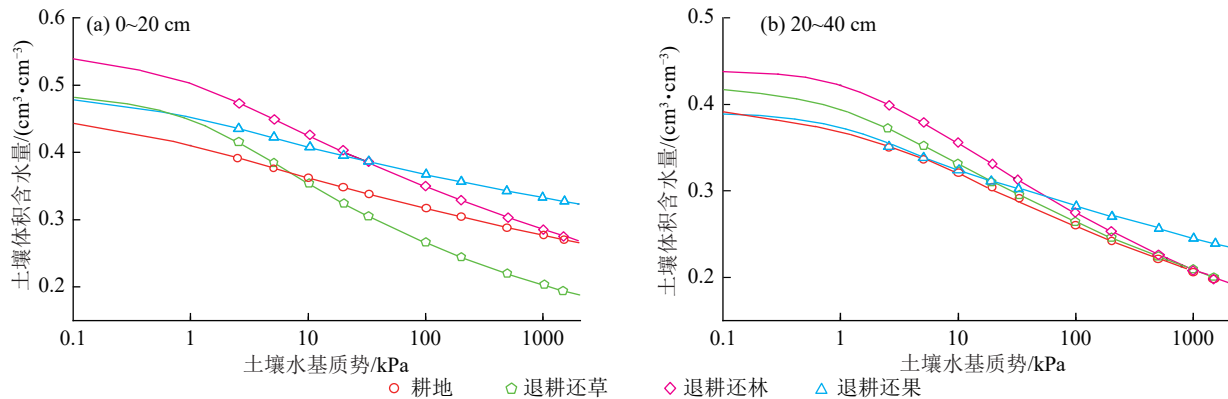
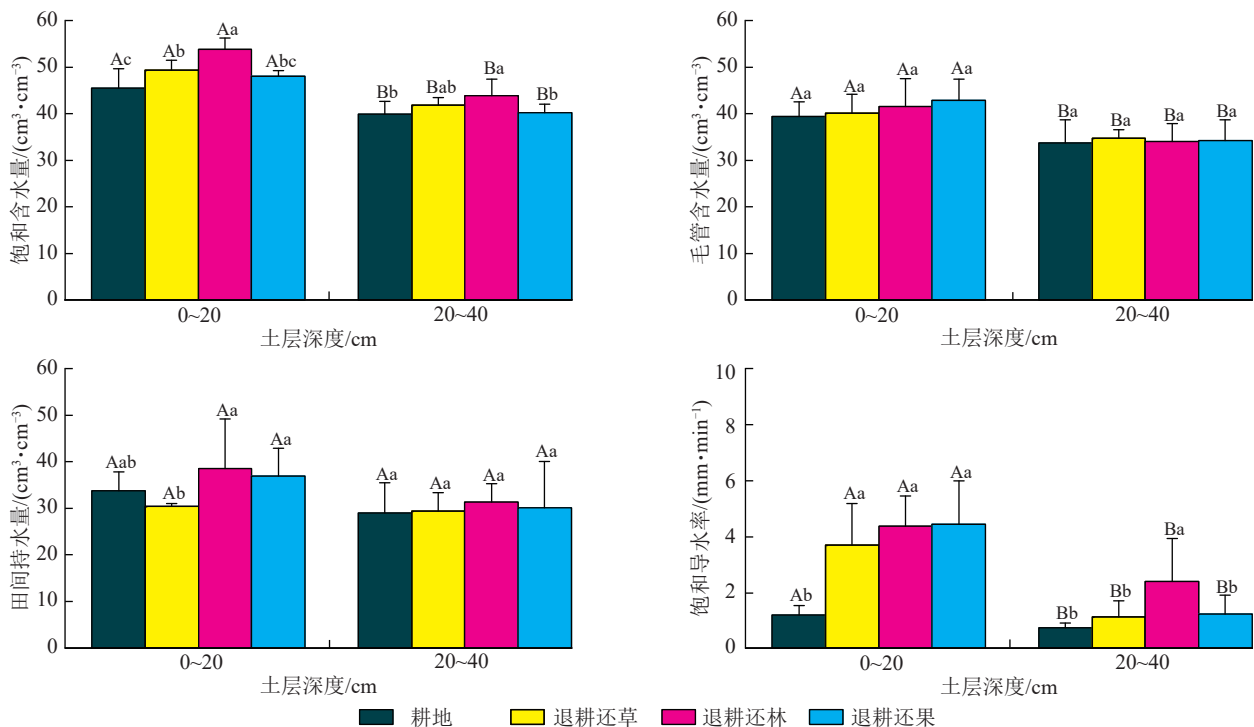


图 2 不同退耕模式下的土壤水分特征

Fig. 2 Soil water characteristic curves under different farmland conversion modes

2.3.2 不同退耕模式下的土壤持水性能与导水性能 土壤饱和含水量、毛管含水量、田间持水量反映不同退耕模式下的土壤持水性能,土壤饱和导水率反映不同退耕模式下的土壤导水性能。退耕还草、退耕还林及退耕还果均能够有效提升0~20 cm 土壤的饱和含水量和饱和导水率,但仅退耕还林能够显著提升20~40 cm 土壤的饱和含水量和饱和导水率(图3)。具体而言,退耕还草、退耕还林及退耕还果后0~20 cm 土壤的饱和含水量分别较耕地高8.37%、18.31%和5.60%,饱和导水率分别较耕地

高210.08%、266.39%和273.11%,退耕还林后20~40 cm 土壤的饱和含水量和饱和导水率分别较耕地显著高10.05%和231.94%。退耕后,毛管含水量及田间持水量在不同退耕模式间并未表现出显著差异,但与退耕还林和退耕还果的改善效应不同,退耕还草减小0~20 cm 土壤的田间持水量。不同退耕模式下的土壤饱和含水量、毛管含水量、饱和导水率均表现为0~20 cm 土层显著高于20~40 cm 土层,田间持水量在不同土层间未表现出显著差异。



注:图柱上方不同的大写字母和小写字母分别表示同一退耕模式不同土层之间和同一土层不同退耕模式之间在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

图 3 不同退耕模式下的土壤水力参数

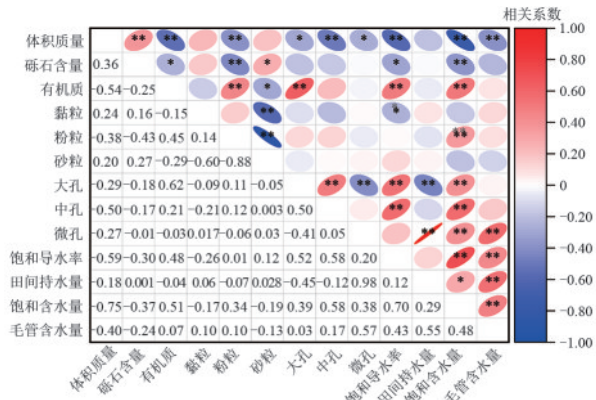
Fig. 3 Soil hydraulic parameters under different farmland conversion modes

2.4 土壤水力特性影响因子

从图4可以看出,不同退耕模式下土壤水力特性与体积质量、有机质、砾石含量及孔隙分布显著相关($p < 0.05$)。相关性分析(图4)表明,土壤饱和含水量

与有机质含量、粉粒占比、大孔率、中孔率、微孔率呈显著正相关,与体积质量、砾石含量呈显著负相关;土壤田间持水量与微孔率呈显著正相关,与大孔率呈显著负相关;土壤毛管含水量与微孔率呈显著正

相关,与体积质量呈显著负相关;土壤饱和导水率与有机质含量、大孔率、中孔率呈显著正相关,与体积质量、砾石含量、黏粒占比呈显著负相关。



注:*表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$ 。

图 4 土壤理化性质、孔隙分布特征与水力参数的相关性

Fig. 4 Correlation between soil physicochemical properties, pore distribution characteristics, and hydraulic parameters

为了进一步探究退耕后引起土壤水力特性变化的关键因子,本研究将土壤水力参数(饱和含水量、毛管含水量、田间持水量、饱和导水率)作为响应变量,将土壤理化性质和孔隙分布特征作为解释因子进行冗余分析(RDA)。由图 5 可知,本研究中测定的土壤理化性质和孔隙分布特征解释了退耕后土壤水力特性变异的 78.90%,其中第 1 排序轴(RDA1)、第 2 排序轴(RDA2)分别解释了水力特性变异的 55.78% 和 20.10%。在这些解释因子中,微孔率、体积质量、大孔率、中孔率、有机质含量、粉粒占比起到显著且重要的作用($p < 0.05$),其解释度分别为 50.0%、16.0%、5.6%、1.6%、1.6% 和 1.6%(表 3)。结合相关性分析(图 4)结果,不同退耕模式主要通过影响土壤体积质量、中孔率和大孔率来改变土壤饱和导水率,主要通过影响土壤体积质量、微孔率和有机质含量来改变土壤持水性能。

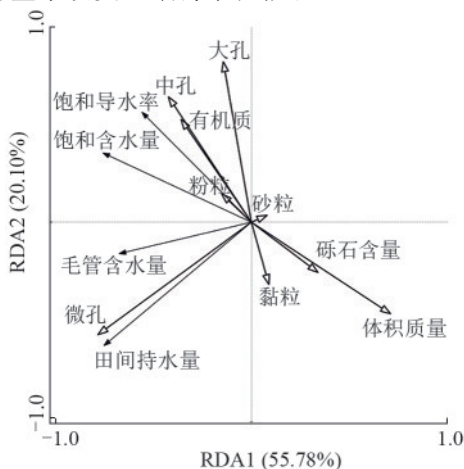


图 5 土壤水力特性的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil hydraulic properties

表 3 土壤水力特性的影响因素

Table 3 Influencing factors of soil hydraulic properties

指标	解释度/%	贡献度/%	F	p
微孔	50.0	64.8	64.0	0.002**
体积质量	16.0	20.7	29.6	0.002**
大孔	5.6	7.3	12.3	0.002**
中孔	1.6	2.1	3.7	0.024*
有机质	1.6	2.1	3.8	0.022*
粉粒	1.6	2.1	4.1	0.014*
砾石含量	0.4	0.6	1.1	0.346
黏粒	0.3	0.3	0.6	0.532
砂粒	<0.1	<0.1	<0.1	0.962

注:*表示在 $p < 0.05$ 水平上对土壤水力特性影响显著;**表示在 $p < 0.01$ 水平上对土壤水力特性影响极显著。

3 讨论

本研究表明,不同的退耕模式对土壤理化性质及孔隙分布有显著影响。不同退耕模式均可显著降低土壤体积质量,是由于退耕后乔木、草本植物、柑橘密集的根系通过穿插、挤压作用,在土壤中形成生物孔隙通道能够有效降低土壤体积质量^[13]。由于人们在耕地和果园里频繁走动,会压实土壤,破坏土壤结构,而退耕还林和还草地受人为干扰较少,故退耕还林及退耕还草模式对土壤体积质量的降低效果优于退耕还果模式,且对于 0~20 cm 土层的体积质量降低效果较 20~40 cm 土层更为显著^[19]。压实效应主要集中于土壤表层使得耕地及退耕还果后 0~20 cm 土壤体积质量显著高于无人扰动退耕还林及还草土壤。退耕还林后土壤有机质的显著提升主要归因于林地的枯枝落叶极易被分解为腐殖质^[20],而退耕还草模式下的土壤由于缺乏有机肥的输入导致其有机质含量低于耕地。在退耕还果模式下,柑橘树的枯落物分解和较耕地更为频繁的有机肥施用也能有效增加 0~20 cm 土层有机质含量。此外,退耕还草、还林及还果后 20~40 cm 土壤砂粒占比的显著增加及粉粒含量的显著降低,是由于在降雨量充沛的三峡库区,退耕后植被根系改善土壤透水性及通气性,进一步增强水分下渗和淋洗作用,水分的深层入渗促进紫砂岩母质的风化,最终导致该土层砂粒相对富集、粉粒占比相对下降^[21]。在土壤孔隙分布方面,与刘俊廷等^[22]研究发现,退耕还林还草能够有效改善土壤孔隙分布的结论相似,本研究也表明,退耕还林还草能够显著提升土壤总孔隙度且主要增加了土壤的中孔率和大孔率。该现象不仅源于林草植被发达根系对土壤孔隙连通性的促进作用,还与有机质对土壤大孔隙发育的显著正效应、体积质量对土壤大/中孔隙发育的显著负效应密切相关。

关^[23-25]。研究表明,在柑橘根系穿插发育与人为生产活动压实的双重作用下,退耕还果虽然对 20~40 cm 土层孔隙度的改善效果有限,但能使 0~20 cm 土壤孔隙度显著提升。

三峡库区不同退耕模式对土壤水力特性的影响机制不同。在持水能力方面,BRADY 等^[18]曾提出土壤微孔隙与中孔隙是持水保水的关键介质;MA 等^[6]亦证实土壤体积质量与有机质对持水能力分别具有显著的负效应和正效应。本研究结果与此一致,退耕还林及退耕还果均能有效提升土壤持水能力归因于退耕还林后的土壤较耕地具有更高的有机质含量、微孔率、中孔率及更低的体积质量,退耕还果后的土壤较耕地具有更高的微孔率及更低的体积质量。退耕还草后土壤体积质量的降低虽然有效提升土壤的饱和含水量,但与前人^[6]研究不同,即 0~20 cm 土层的田间持水量降低,是由于退耕还草后,0~20 cm 土层大孔率的增多及微孔率的减少对田间持水量有显著的负效应^[26]。在导水能力方面,诸多研究^[27-30]表明,土壤体积质量与砾石含量对土壤饱和导水率呈显著负效应,而土壤有机质、大孔隙及中孔隙则具有显著正效应。本研究显示,不同退耕模式均促使 0~20 cm 土层体积质量降低及大/中孔隙发育,故退耕还林、还草、还果均显著提升该土层饱和导水率;但仅退耕还林可显著增加 20~40 cm 土层中孔率与有机质含量,且退耕还草、还果模式下该土层砾石含量较高,导致仅退耕还林能显著提升 20~40 cm 土层饱和导水率。冗余分析结果显示,微孔率对土壤水力特性变异的解释度较高。但在本研究中,不同退耕模式主要提高土壤的大孔率和中孔率,微孔率并未发生显著变化,同时,饱和导水率仅与大孔率、中孔率呈显著正相关,而田间持水量、饱和含水量、毛管含水量均与微孔率呈显著正相关。此结果也解释了为何退耕对土壤饱和导水率的影响大于对土壤持水性能的影响。

从整体情况而言,在三峡库区 3 种典型的退耕模式当中,退耕还林在提升土壤持水能力和导水能力方面表现最为突出^[8-9],退耕还果次之,但仍优于退耕还草。与黄土高原等地区的研究结论形成鲜明对比,后者普遍认为退耕还果无法有效改善土壤水力特性^[5,8],这种区域差异可能由气候条件及树种特性共同驱动。不同于黄土高原半干旱气候下种植的苹果树,三峡库区湿润气候主导下以柑橘树为主栽树种。一方面,柑橘树须根系系统较苹果树更为发达,其密集根系的穿插生长对土壤孔隙结构发育的促进作用更强,进而显著提升土壤持水与导水能力^[13,30];另

一方面,充沛的水分条件为柑橘根系生长提供理想环境,进一步强化根系对土壤物理结构的改良效应。值得注意的是,三峡库区坡耕地治理成效评价需兼顾生态与经济效益,尽管退耕还林生态效益最佳,但退耕还果通过发展特色产业提升了居民收入,不仅形成以柑橘为主的优势产业和特色农业品牌,延伸农业产业化链条,加强特色农产品深加工能力,部分果园还开发旅游观光功能拓宽收入途径,由此建立起具有地域特色和市场竞争力农业绿色循环发展模式,推动乡村经济平稳发展、农民收入提升,助力农户脱贫致富^[31]。因此,基于三峡库区的实证研究结果。建议在三峡库区,除退耕还林模式外,可因地制宜地推广退耕还果模式,以实现生态效益与经济效益的双赢。该发现为三峡库区的水土保持和林草工程建设提供科学依据。

4 结论

退耕还草、退耕还林及退耕还果后土壤的饱和导水率较耕地分别显著提升 151.31%、253.40% 和 196.33%,退耕还林及退耕还果均提升 0~40 cm 土壤持水能力,但退耕还草降低 0~20 cm 的持水性能。在三峡库区 3 种典型的退耕模式中,退耕还林在提升土壤持水能力和导水能力方面表现最为突出,退耕还果次之,退耕还草最差。不同退耕模式主要通过降低土壤体积质量及增加土壤的中孔率和大孔率来提升土壤饱和导水率,退耕还林及退耕还果主要通过降低土壤体积质量及增加土壤的微孔率和有机质含量来提升土壤持水性能。

为了兼顾生态效益与经济效益,建议在三峡库区,除退耕还林模式外,可因地制宜地推广退耕还果模式。

参考文献:

- [1] 苏正安,熊东红,张建辉,等.紫色土坡耕地土壤侵蚀及其防治措施研究进展[J].中国水土保持,2018(2):42-47.
SU Z A, XIONG D H, ZHANG J H, et al. Research progress of soil erosion of purple soil slope farmland and its prevention and control measures [J]. Soil and Water Conservation in China, 2018(2):42-47.
- [2] HAN C, SONG M X, TANG Q, et al. Post-farming land restoration schemes exhibit higher soil aggregate stability and organic carbon: Evidence in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Catena, 2023, 227: e107099.
- [3] 王金满,荆肇睿,宋杨睿.压实对土壤水力特性影响的研究进展[J].江西农业大学学报,2018,40(3):618-628.
WANG J M, JING Z R, SONG Y R. Effects of compaction on soil hydraulic properties: A review [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(3):618-628.

- [4] GAO Z Y, NIU F J, WANG Y B, et al. Root-induced changes to soil water retention in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(3): 791-803.
- [5] YANG J, MA H, ZHANG R F, et al. Effects of "Grain for Green" program on soil hydraulic properties: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2025, 453: e117130.
- [6] MA Y L, MENG L C, LIU Y F, et al. Artificial grassland revegetation improves soil water retention and storage capacity of the degraded hillside alpine meadow [J]. *Land Degradation and Development*, 2025, 36(1): 133-143.
- [7] 杨亚辉. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤理化性质影响分析[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2017.
- YANG Y H. Analysis on the influence of vegetation restoration on soil physical and chemical properties in loess hilly and gully region [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [8] ZHANG S Y, ZHAO G J, FAN J J, et al. Variations of soil infiltration in response to vegetation restoration and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 372: e123356.
- [9] 葛俸池, 许明祥. 黄土丘陵沟壑区不同退耕模式的土壤水文性质影响对比[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 154-160.
- GE F C, XU M X. Comparison of soil hydrologic properties under different conversion patterns in the hilly-gully region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 154-160.
- [10] 张贤林, 冯梦蝶, 何丙辉, 等. 喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤入渗特征及适宜模型[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 34-41.
- ZHANG X L, FENG M D, HE B H, et al. Soil infiltration characteristics and suitable models under different land use types in karst trough-valley region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 34-41.
- [11] 马良. 三峡库区退耕还林小流域土壤侵蚀及养分输出研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- MA L. Study on soil erosion and nutrient output in small watershed of returning farmland to forest in Three Gorges Reservoir area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [12] 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制: 以兰陵溪小流域为例[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 83-88.
- WANG T, HUANG Z L, ZENG L X, et al. Assessment on the comprehensive control of soil erosion and soil nutrient losses in the reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir area: A case study of Lanlingxi watershed [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 83-88.
- [13] 董栌遥. 秭归山地橘园土壤的团聚体和可蚀性特征研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- DONG L Y. Study on aggregate and erodibility characteristics of soil in Zigui mountain orange orchard [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [14] 秦文静, 王云琦, 王彬, 等. 土地利用和气候变化对王家桥小流域径流的影响[J]. *水文*, 2019, 39(2): 49-54.
- QIN W J, WANG Y Q, WANG B, et al. Impacts of land use and climate change on runoff in Wangjiaqiao watershed [J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(2): 49-54.
- [15] REYNOLDS W D, ELEICK D E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter [J]. *Soil Science*, 1985, 140(4): 292-302.
- [16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [17] REYNOLDS W D, DRURY C F, TAN C S, et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality [J]. *Geoderma*, 2009, 152(3/4): 252-263.
- [18] 尼尔·布雷迪, 雷·韦尔. 土壤学与生活 [M]. 李保国, 徐建明译. 北京: 科学出版社, 2019: 153-154.
- BRADY N C, WEIL R R. The nature and properties of soils [M]. LI B G, XU J M. Beijing: Science Press, 2019: 153-154.
- [19] 徐远慧, 冯璐, 屈媛媛, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 57-63.
- XU Y H, FENG L, QU Y Y, et al. Effects of different restoration years of grain for green on soil properties and infiltration performance in loess gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 57-63.
- [20] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(9): 119-126.
- HUANG R, HUANG L, HE B H, et al. Characteristics of soil water infiltration under different biological regulation measures in Three Gorges Reservoir region [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2013, 35(9): 119-126.
- [21] 郭进, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 18-21.
- GUO J, ZHANG J J, YAN D C, et al. Particle characteristics of eroded purple soil from slope land in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Journal of Soil and Water*

- Conservation, 2012, 26(3):18-21.
- [22] 刘俊廷, 张建军, 孙若修, 等. 晋西黄土区退耕年限对土壤孔隙度等物理性质的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1):94-103.
- LIU J T, ZHANG J J, SUN R X, et al. Effects of the conversion time of cropland into forestry on soil physical properties in loess area of western Shanxi Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1):94-103.
- [23] PESSOA T N, SANTOS R S, LIBARDI P L, et al. Influence of intensive cropping of vegetables on physical and hydraulic properties and functions of an Oxisol in the Brazilian Cerrado[J]. Catena, 2024(235):e107651.
- [24] PESSOA T N, LIBARDI P L. Physical-hydric properties of Oxisols as influenced by soil structure and clay mineralogy[J]. Catena, 2022(211):e106009.
- [25] DAI C T, LIU Y J, WANG T W, et al. Quantifying the structural characteristics and hydraulic properties of shallow Entisol in a hilly landscape[J]. International Agrophysics, 2022, 36(2):105-113.
- [26] WEI Z M, XI H C, PEI X J, et al. Methods and mechanisms for enhancing the water retention properties of Jiuzhaigou disintegrated rubble soils[J]. Journal of Mountain Science, 2025, 22(2):729-746.
- [27] ALI KALHOROS, XU X X, DING K, et al. The effects of different land uses on soil hydraulic properties in the Loess Plateau, northern China[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(11):3907-3916.
- [28] ZHU P Z, CHEN S Q, WANG C S, et al. Short-term conservation tillage degrades soil infiltration properties in the black soil region of northeast China [J]. European Journal of Soil Science, 2024, 75(2):e13479.
- [29] ZHANG Z B, LIU K L, ZHOU H, et al. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2019, 571:1-10.
- [30] 杨昊晟, 马永胜, 胡笑涛, 等. 种植年限对渭北旱塬苹果园土壤孔隙结构及水力特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(5):94-104.
- YANG H S, MA Y S, HU X T, et al. Effects of different planting years on soil pore structure and hydraulic characteristics of apple orchards in the arid area of northern Weihe River basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(5):94-104.
- [31] 孙嘉, 康满春, 刘定湘, 等. 三峡库区坡耕地治理成效评价研究[J]. 中国水土保持, 2023(8):68-72.
- SUN J, KANG M C, LIU D X, et al. Evaluation of the effectiveness of slope farmland management in the Three Gorges Reservoir area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(8):68-72.
- (上接第 117 页)
- [29] THANGAVEL P, ANJUM N A, MUTHUKUMAR T, et al. Arbuscular mycorrhizae: Natural modulators of plant-nutrient relation and growth in stressful environments [J]. Archives of Microbiology, 2022, 204(5):e264.
- [30] 张思颖, 陈荣蓉, 程先. 重庆龙溪河流域水生生态系统服务时空演变及对土地利用变化响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4):173-183.
- ZHANG S Y, CHEN R R, CHENG X. Spatiotemporal changes of water-related ecosystem services and the responses to land use changes of the Longxi River basin, Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):173-183.