

林草植被恢复类型对黄土团聚体稳定性和入渗特性的影响

帕力夏提·格明¹, 王龙², 徐学选², 王维维¹,
张连科³, 李梦瑶¹, Farhat Ullah Khan², 杜锋²

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 对比不同林草植被恢复类型下黄土团聚体稳定性和入渗特性的差异, 为黄土高原地区生态恢复模式的合理优化提供理论支持。[方法] 以黄土区撂荒地(C₁, 对照)、苜蓿地(C₂)、天然草地(C₃)、油松+侧柏混交林(L₁)、刺槐+侧柏混交林(L₂)为对象, 采用萨维诺夫法和单环双水头法分别测定了水稳性团聚体组成状况、饱和导水率(K_s)。以平均质量直径(MWD)、几何直径(GMD)、颗粒分形维数(D)、破坏率(PAD)、>0.25 mm 水稳性团聚体占比(M_w)和饱和导水率为评价指标, 分析了不同林草植被恢复类型的土壤团聚体稳定性和入渗特性差异及其影响因素。[结果] ①0—30 cm 土层范围内, C₁ 的 GMD 和 MWD 最低, 林草植被恢复类型的 GMD, MWD 表现为 L₁ 和 C₃ > L₂ 和 C₂, 而 PAD 和 D 则相反。②0—10 cm 土层, L₁ 的 >0.25 mm 水稳性团聚体含量最高(47.24%), 其次是 C₃ 和 L₂, C₁ 最低(24.00%); 而 10—30 cm 土层, C₃ 的 >0.25 mm 水稳性团聚体含量最高(10—20 cm 处为 35.41%, 20—30 cm 处为 27.96%), L₂ 最低(10—20 cm 处为 11.46%, 20—30 cm 处为 8.00%)。③不同林草植被恢复类型的表层土壤入渗特性变异系数均介于 0.001~0.360, L₁ 的 K_s (0.307 cm/min) 最大, C₁ 的 K_s (0.044 cm/min) 最小。④团聚体稳定性指标(PAD 除外)和 K_s 均与有机质、孔隙度、容重呈现显著或极显著相关。[结论] 林草植被恢复有助于改善黄土团聚体稳定性和入渗特性, 长期林地恢复类型(L₁)的团聚体稳定性和入渗特性优于天然草地(C₃), 而短期林地恢复类型(L₂)却不如天然草地(C₃), 植被恢复应注重时间的积累。

关键词: 植被恢复; 团聚体稳定性; 入渗特性; 林草地; 黄土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0024-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 帕力夏提·格明, 王龙, 徐学选, 等. 林草植被恢复类型对黄土团聚体稳定性和入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 24-31. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.004; Palixiati · Geming, Wang Long, Xu Xuexuan, et al. Effects of forest and grass restoration types on aggregate stability and infiltration characteristics of loess [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 24-31.

Effects of Forest and Grass Restoration Types on Aggregate Stability and Infiltration Characteristics of Loess

Palixiati · Geming¹, Wang Long², Xu Xuexuan²,

Wang Weiwei¹, Zhang Lianke³, Li Mengyao¹, Farhat Ullah Khan², Du Feng²

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3.Geological Hazards Prevention Research Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The differences in aggregate stability and infiltration characteristics of loess under different forest and grass vegetation restoration types were compared in order to provide a theoretical basis for the optimization of ecological restoration patterns in the Loess Plateau. [Methods] Abandoned land (C₁,

收稿日期: 2022-05-08

修回日期: 2022-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426); “植物根系构型与力学特性对黄土区浅层坡体稳定性的影响”(41771322); 甘肃省科学院应用研究与开发项目“马兰黄土边坡土壤侵蚀降雨模拟研究”(2019-JK-07)

第一作者: 帕力夏提·格明(1996—), 女(哈萨克族), 新疆维吾尔自治区巩留县人, 硕士研究生, 研究方向为草原利用与生态修复。Email: palixiati@163.com.

通信作者: 徐学选(1966—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤水分生态研究。Email: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn.

control), alfalfa land (C_2), natural grassland (C_3), mixed forest land of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* (L_1), and mixed forest land of *Robinia pseudoacacia* and *P. orientalis* (L_2) were used to investigate differences in aggregate stability and infiltration characteristics and their exogenous factors. Water-stable aggregate composition and saturated hydraulic conductivity were determined by the Savinov method and a single-ring two-ponding depth infiltrometer, respectively. Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D), percentage of aggregate destruction (PAD), water-stable macroaggregate content (>0.25 mm, M_w), and saturated hydraulic conductivity sample (K_s) were used as evaluation indicators. [Results] ① In the 0—30 cm soil layer, C_1 had the lowest GMD and MWD, and GMD and MWD in forest and grass vegetation restoration types followed the order of [L_1 and C_3] $>$ [L_2 and C_2], respectively, whereas PAD and D showed the opposite order. ② In the 0—10 cm soil layer, L_1 dominated the highest macroaggregate (>0.25 mm) content (47.24%), followed by C_3 and L_2 , while C_1 had the lowest content (24.00%). In the 10—30 cm soil layer, C_3 dominated the highest macroaggregate (>0.25 mm) content (35.41% at 10—20 cm; 27.96% at 20—30 cm), while L_2 had the lowest content (11.46% at 10—20 cm; 8.00% at 20—30 cm). ③ The variation coefficients of topsoil infiltration characteristics for different restoration types ranged from 0.001 to 0.360. The K_s (0.307 cm/min) of L_1 was the highest, while the K_s (0.044 cm/min) of C_1 was the lowest. ④ Aggregate stability indicators (except PAD) and K_s were significantly correlated with soil organic carbon, porosity, and bulk density. [Conclusion] The restoration of forest and grass vegetation was beneficial for improving aggregate stability and infiltration performance. Compared with natural grassland, long-term forest restoration exhibited better aggregate stability and infiltration characteristics, but those characteristics were worse for short-term forest restoration than for natural grassland. Time accumulation should be emphasized when evaluating the effects of vegetation restoration.

Keywords: vegetation restoration; soil infiltration; aggregate stability; forest and grassland; loess

黄土高原地区是中国典型的水土流失区, 黄河流域大约 89.21% 的水土流失面积分布于黄土高原^[1]。植被恢复是该区域水土流失防治的重要措施, 良性的植被恢复类型可以改善土壤团聚体稳定性和入渗特性, 从而达到增强土壤抗蚀性能, 保持水土, 防风固沙的生态效果。团聚体稳定性是土壤团聚体抵抗外力破坏的能力, 在改善土壤孔隙结构、持水能力、渗透性和调节土壤肥力等方面具有重要作用, 而且与土壤抗蚀性能关系密切^[2-4]。入渗特性是土壤对降水就地吸收的能力^[5], 对于干旱缺水的黄土高原地区土壤水分补充非常重要, 良好的入渗特性可以延长地表径流的产生时间, 有助于减缓水土流失。

目前国内外已有众多有关植被恢复对土壤团聚体稳定性或入渗特性的影响研究。冯璐^[6]对不同退耕年限草地的研究表明, 相较于农地, 草地在土壤团聚体稳定性和入渗性能方面具有显著的改善作用。海龙等^[7]的相关研究表明, 种植苜蓿可促进团聚体稳定性, 团聚体稳定性大小与种植年限有关。陈文媛等^[8]对比研究认为退耕还草比退耕还林土壤团聚体稳定性更强, 入渗性能更好; 而 Liu 等^[9]、Zeng 等^[10]研究证明林地比草地土壤团聚体稳定性更强, 更有效地增加入渗和减少径流。可见, 目前植被恢复对团聚体稳定性和入渗性能的影响研究, 主要关注单一的植

被恢复类型。植被恢复是黄土区生态修复的关键手段, 多种植被恢复类型下土壤团聚体稳定性和入渗特性将如何变化, 仍然缺乏关注, 而且现有的黄土区多种植被恢复类型研究结果存在较大差异, 因此有必要开展进一步研究。

甘肃省兰州市地处黄土高原西部, 自然因素和人为因素的双重影响导致兰州水土流失严重、生态环境恶化, 从而严重制约了城市可持续发展^[11]。近年来兰州市对城市周边的南山、北山实施了系列植被恢复措施, 使得当地植被覆盖率有所增加, 生态环境得到了显著改善^[12]。本文开展不同植被恢复类型对当地黄土物理性质的影响研究, 特别是对团聚体稳定性和入渗特性的影响, 旨在为当地生态恢复模式的进一步合理优化提供理论支持。

1 研究区概况

研究区位于兰州市城关区 ($35^{\circ}56'$ — $36^{\circ}10'$ N, $103^{\circ}46'$ — $103^{\circ}59'$ E), 海拔 1 497~2 319 m, 属于黄土丘陵沟壑区, 自北向南可大致划分为北山、城区和南山, 总面积约为 208 km², 处于季风气候与非季风气候的过渡区, 是典型的温带半干旱气候。年均降水量为 328 mm, 多集中在 7—8 月, 年均蒸发量为 1 437 mm, 年均日照时间 2 491 h, 无霜期大于 180 d,

年平均风速为 0.94 m/s。降水量少而集中,蒸发强度大,温差较大以及日照充足。土壤多为马兰黄土母质发育而成的灰钙土,pH 值介于 8~9 之间。研究区平均年径流量约为 18 mm,土壤侵蚀模数为 1 500 t/(km²·a)。

2 研究方法

2.1 样地选择

本研究选取 5 个样地:①L₁ 为侧柏+油松混交林,林龄超过 25 a(具体时间不详),侧柏树高在 3~4 m,油松树高在 3~5 m,林下地表植被覆盖较少,但有明显的生物结皮;②L₂ 为侧柏+刺槐混交林,于 2004 年由农地退耕还林而来,刺槐树高在 5~6 m,侧柏树高在 3~4 m,长势较好,郁闭度较高,地表杂

草覆盖度高,土壤表层有明显的枯枝落叶层;③C₁ 为撂荒地,撂荒时间始于 2015 年;④C₂ 为苜蓿地,于 2015 年开始种植并定期刈割,此前多种植小麦;⑤C₃ 为天然草地,位于研究区北山山顶,地表有明显的生物结皮。样地选择的依据:林地面积占研究区的 11.7%,侧柏、油松、刺槐均为林地的主要绿化树种;草地面积占 32.8%,C₁,C₂,C₃ 面积在研究区草地类型中均占有相当的比重;L₁,L₂,C₁,C₂ 的选择均与当地的退耕还林政策和削山造地工程措施有密切关系,可以更好地对比探讨人工改变土地利用/覆被后,不同植被恢复类型之间的水土保持效应差异。5 个样地中心点分布见图 1,每个样地面积不小于 2 hm²,所有采样点均布设在样地的缓坡段。各样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

| 样地植被类型 | 样地编号 | 海拔/m | 植被覆盖度/% | 群落结构 |
|-----------|----------------|-------|---------|---------------------|
| 侧柏+油松混交林地 | L ₁ | 2 047 | 65 | 侧柏—油松+白茅+白莲蒿 |
| 侧柏+刺槐混交林地 | L ₂ | 2 033 | 98 | 刺槐—侧柏+刺儿菜+青杞+小藜+野青茅 |
| 撂荒地 | C ₁ | 2 070 | 70 | 白莲蒿+披碱草+猪毛蒿 |
| 苜蓿地 | C ₂ | 2 095 | 75 | 紫苜蓿+紫菀+披碱草+白莲蒿+猪毛蒿 |
| 天然草地 | C ₃ | 1 778 | 70 | 长芒草+多裂骆驼蓬 |

注:表中植物学名分别为:侧柏 *Platycladus orientalis*,油松 *Pinus tabulaeformis*,白茅 *Imperata cylindrica*,白莲蒿 *Artemisia acrorum*,刺槐 *Robinia pseudoacacia*,刺儿菜 *Cirsium setosum*,青杞 *Solanum septemlobum*,小藜 *Chenopodium ficifolium*,野青茅 *Deyeuxia pyramidalis*,披碱草 *Elymus dahuricus*,猪毛蒿 *Artemisia scoparia*,紫苜蓿 *Medicago sativa*,紫菀 *Aster tataricus*,长芒草 *Stipa bungeana*,多裂骆驼蓬 *Peganum multisetum*。

2.2 试验方法

于 2020 年 8 月中下旬采集土样,每个样地采用 S 形布点法布设 3 个采样点,每个采样点分 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 共 3 个土层采样,每个土层 3 个重复。5 个样地共计 135 个土壤样品。土样装铝制盒密封带回实验室自然风干用于土壤理化性质测定。采样期间对表层(0—10 cm)土壤进行野外实地入渗特性测定,入渗特性采用单环双水头入渗仪(智明 IZM160,中国)。单环双水头入渗仪由低水头供水马氏瓶、高水头供水马氏瓶、钢制入渗环、连通管和阀门等组成,两个马氏瓶高度差为 5 cm,并共用一个底盘。入渗试验选择平整且未受人为扰动的样点,清理样方上的植被,将单环垂直坡面砸入地表 6 cm 处,在 5 cm 水头达到稳定入渗速率后,增加水头到 10 cm,再次达到稳定入渗后停止试验,换另一个点位,如此重复试验 3 次。记录好数据,分别计算低水头和高水头下的稳定入渗率,并通过公式计算饱和导水率。

土壤水稳性团聚体组成测定采用萨维诺夫法,取风干后土样 300 g 进行干筛,称量获得 >5,2~5,1~

2,0.25~1,<0.25 mm 共 5 个粒级的机械稳定性团聚体,称重并计算各粒级团聚体质量百分比。水稳性团聚体测定按照干筛法获得的各粒级团聚体比例配制成 100 g 土样,置入团聚体分析仪内(TTF-100 型),在转速为 1 400 r/min、振幅为 40 mm 的设置下振荡 30 min 后取出,再用水将各级筛子上的团聚体洗入到已有编号的烧杯中,倾去上清液,烘干并称重,计算各粒级土壤水稳性团聚体百分比,相加得出 >0.25 mm 水稳性团聚体百分比。

2.3 土壤团聚体稳定性和入渗特性相关指标计算

(1) 土壤团聚体稳定性常用平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、颗粒分形维数(D)和破坏率(PAD)等指标进行评价,各指标的计算公式如下^[13-14]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{d}_i w_i) \quad (1)$$

$$GMD = \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

$$D=3-\left[\lg \frac{w_{(\delta \leq d_i)}}{w_0} / \lg \frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right] \quad (3)$$

$$\text{PAD}=\frac{M_d-M_w}{M_d} \times 100\% \quad (4)$$

式中: \bar{d}_i 为第 i 粒级平均直径(mm); w_i 为第 i 粒级颗粒质量百分比(%); x_i 为相邻两级团聚体平均粒径(mm); $w_{(\delta \leq d_i)}$ 为粒径 $\leq d_i$ 的颗粒质量百分比(%); w_0 为所有粒级颗粒质量百分比,即为 100(%); d_{\max} 为最大粒径,即 10 mm; M_d 为样品干筛后颗粒直径 > 0.25 mm 的质量百分比(%); M_w 为样品湿筛后颗粒直径 > 0.25 mm 的质量百分比(%).

(2) 饱和导水率(K_s)是常用的入渗特性指标,采用 Nimmo 等^[15]总结的计算公式,如下所示:

$$K_s=\frac{I}{F} \quad (5)$$

$$F=1+\frac{\lambda+H}{C_1 d+C_2 b}=1+\frac{\lambda+H}{\Delta} \quad (6)$$

$$K_s=\frac{I_1 \Delta}{\Delta+\lambda+H_1}=\frac{I_2 \Delta}{\Delta+\lambda+H_2} \quad (7)$$

$$K_s=\frac{\Delta(I_2-I_1)}{H_2-H_1} \quad (8)$$

式中: K_s 代表饱和导水率(cm/min); I 是入渗速率(cm/min); F 是土壤吸附特性与入渗仪几何形态的函数; λ 是与土壤毛管长度有关的参数(cm); H 是入渗环内积水的深度(cm); d 是入渗环插入土壤中

的深度(cm),在本试验中 d 值为 6 cm; b 为入渗环内部的半径(cm),在本试验中 b 值为 7.5 cm; C_1 和 C_2 为参数,值分别为 0.993 与 0.578; Δ 等于 $C_1 d+C_2 b$, 值为 10.293 cm。在使用单环双水头法测定饱和和导水率时,需要 H_1 和 H_2 两个水头, H_1 为低水头,值在 5 cm 左右, H_2 为高水头,值在 10 cm 左右,对应的 I 分别为 I_1 和 I_2 ,即对应水头的稳定入渗率(cm/min); 对公式进行化简,则可消去 λ 并得到计算 K_s 的公式,见公式(8)。

3 结果与分析

3.1 不同林草植被恢复类型的土壤基本性质

对不同林草植被恢复类型 0—30 cm 土层的土壤基本性质进行了对比(如表 2 所示)。随着土层深度的增加,不同植被恢复类型土壤的饱和含水率和孔隙度呈现增加的趋势;容重(L_2 除外)和根系生物量(C_3 除外)呈现减少的趋势($p < 0.05$)。其中, L_1 和 C_3 的饱和含水率、孔隙度和容重较优,说明侧柏+油松混交林和天然草地的土壤疏松、多孔,表现出较好的透水/气性;与 L_1 相比, L_2 的饱和含水率、孔隙度和容重则较差,这可能与 L_2 退耕时间较短有关。 C_1 容重最大,饱和含水率、孔隙度最小,并与其他样地的差异显著($p < 0.05$),说明与撂荒地相比,其他林草植被恢复类型可以改善土壤结构,提高土壤蓄水能力。

表 2 不同林草植被恢复类型的土壤理化性质、根系生物量

Table 2 Soil physicochemical properties and root biomass in different vegetation restoration types

| 样地编号 | 土层深度/cm | 容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 饱和含水率/% | 孔隙度/% | 有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | pH 值 | 根系生物量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|-------|---------|--|----------------------|-------------------|---|---------------------|--|
| C_1 | 0—10 | 1.40 ^{Aa} | 34.03 ^{Ac} | 47 ^{Bc} | 11.99 ^{Ad} | 8.46 ^{Bbc} | 3 913.05 ^{Aa} |
| | 10—20 | 1.21 ^{Bb} | 45.39 ^{Bb} | 51 ^{Ab} | 10.04 ^{Bc} | 8.57 ^{Aa} | 2 197.49 ^{ABa} |
| | 20—30 | 1.19 ^{Bab} | 46.45 ^{Bbc} | 50 ^{Ab} | 7.20 ^{Cd} | 8.52 ^{ABa} | 521.90 ^{Bb} |
| C_2 | 0—10 | 1.24 ^{Abc} | 44.23 ^{Ab} | 54 ^{Ab} | 12.47 ^{Ac} | 8.61 ^{Aab} | 5 711.47 ^{Aa} |
| | 10—20 | 1.23 ^{Ab} | 44.32 ^{Ab} | 53 ^{Ab} | 9.12 ^{Bcd} | 8.60 ^{Aa} | 3 275.96 ^{Aa} |
| | 20—30 | 1.21 ^{Aa} | 46.12 ^{Ac} | 53 ^{Abc} | 9.96 ^{Bc} | 8.64 ^{Aa} | 1 427.57 ^{Aab} |
| C_3 | 0—10 | 1.21 ^{Ab} | 44.88 ^{Bb} | 55 ^{Ab} | 15.93 ^{Ad} | 8.39 ^{Ac} | 3 953.78 ^{Aa} |
| | 10—20 | 1.15 ^{Bbc} | 49.15 ^{Ab} | 56 ^{Ab} | 14.56 ^{Ab} | 8.40 ^{Aa} | 893.02 ^{Ba} |
| | 20—30 | 1.13 ^{Bb} | 49.46 ^{Ab} | 56 ^{Ab} | 13.33 ^{Ab} | 8.57 ^{Aa} | 2 985.17 ^{Aa} |
| L_1 | 0—10 | 1.09 ^{Ac} | 52.48 ^{Ba} | 58 ^{Aa} | 30.71 ^{Aa} | 8.63 ^{Ab} | 4 733.51 ^{Aa} |
| | 10—20 | 1.08 ^{Ac} | 56.87 ^{ABa} | 59 ^{Aa} | 25.68 ^{Ba} | 8.55 ^{Ba} | 2 145.77 ^{Ba} |
| | 20—30 | 1.01 ^{Ac} | 59.59 ^{Aa} | 60 ^{Aa} | 20.65 ^{Ca} | 8.49 ^{Ba} | 1 280.06 ^{Cab} |
| L_2 | 0—10 | 1.19 ^{Abc} | 41.65 ^{Ab} | 51 ^{ABb} | 25.84 ^{Ab} | 8.75 ^{Aa} | 3 008.54 ^{Aa} |
| | 10—20 | 1.21 ^{Aa} | 41.26 ^{Ad} | 49 ^{Bc} | 7.61 ^{Bd} | 8.68 ^{Aa} | 1 520.43 ^{Aa} |
| | 20—30 | 1.26 ^{Aa} | 37.63 ^{Ac} | 52 ^{Ac} | 5.42 ^{Ce} | 8.56 ^{Ba} | 1242.46 ^{Aa} |

注:数据后不同大写字母表示同一样地不同土层深度间差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一土层不同样地间差异显著($p < 0.05$)。下同。

不同林草植被恢复类型土壤有机质含量均呈现随土层深度的增加而减少的趋势($p < 0.05$)。0—

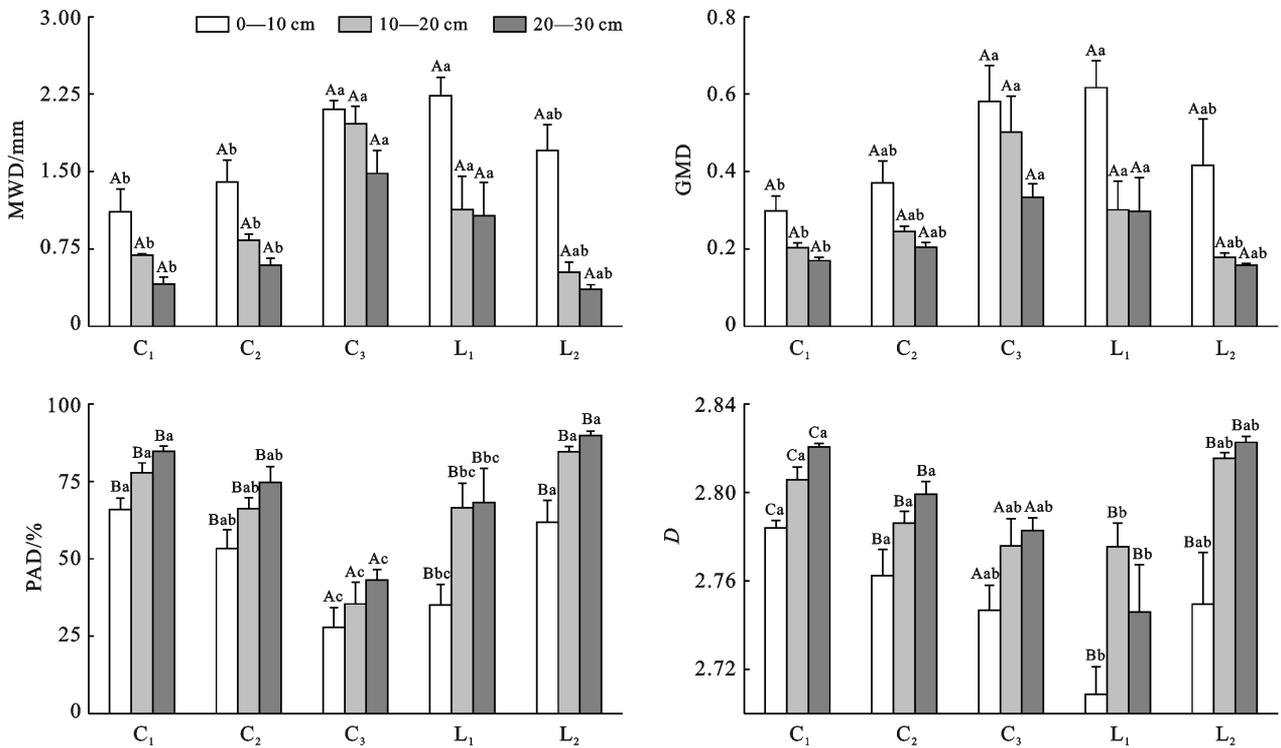
10 cm 土层, L_1 和 L_2 有机质含量相对较高(分别为 30.71, 25.84 g/kg), C_3 , C_2 , C_1 的有机质含量较低;而

10—20 cm 和 20—30 cm 土层, L_2 的有机质含量最低, 说明侧柏+刺槐混交林的枯枝落叶对中、下层土壤有机质的改善不明显。

3.2 不同林草植被恢复类型的土壤团聚体稳定性

平均质量直径(MWD)与几何直径(GMD)为表征团聚体稳定性常用的指标, 其值越大, 团聚体团聚程度越高, 稳定性越强(图 1)。水稳性团聚体 MWD 与 GMD 在不同植被恢复类型、不同土层的趋势具有一致性, 均为随着土层深度的增加而逐渐降低。0—10 cm 土层 GMD 和 MWD 大小表现为: $L_1 > C_3 > L_2 > C_2 > C_1$; 中下层为: $C_3 > L_1 > C_2 > L_2 > C_1$, 说明 L_1 ,

C_3 土壤团聚体稳定性较好, L_2, C_2 次之, C_1 最差, 这说明较之撂荒地, 林草地类型有助于提高土壤团聚体结构的稳定性。破坏率(PAD)、分形维数(D)亦为表征团聚体稳定性的常用指标, PAD 和 D 越小, 团聚体结构越稳定。随土层深度的增加, 不同林草植被恢复类型的 PAD 和 D 均增加。0—10 cm 土层, D 表现为: $L_1 < C_3 < L_2 < C_2 < C_1$, PAD 则略有不同, 表现为: $C_3 < L_1 < C_2 < L_2 < C_1$; 10—20 cm 土层, D 和 PAD 均表现为: $C_3 < L_1 < C_2 < L_2 < C_1$, 且 0—10 cm 与 10—20 cm 土层呈现显著性差异($p < 0.05$), 这亦表明林草地对土壤团聚体结构具有改善作用。



注: ①MWD 为平均质量直径; GMD 为几何平均直径; D 为颗粒分形维数; PAD 为破坏率; ② L_1, L_2, C_1, C_2, C_3 为样地类型(详见表 1)。下同。

图 1 不同林草植被恢复类型的土壤团聚体稳定性指标

Fig.1 Soil aggregate stability in different vegetation restoration types

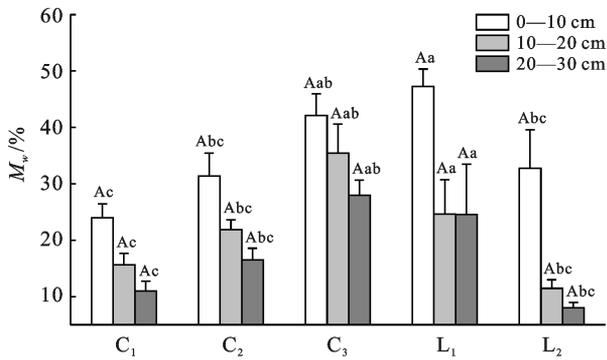
不同林草植被恢复类型土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量 (M_w) 见图 2。随土层深度的增加, > 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈现减少。0—10 cm 土层, L_1 的 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量最高为 47.24%, 其次是 C_3 和 L_2 , 而 C_1 的含量最低为 24.00%, 这说明林草地的表层土壤团聚体稳定性优于撂荒地。10—30 cm 土层, C_3 的 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量最高(10—20 cm 处为 35.41%; 20—30 cm 处为 27.96%), 其次是 L_1, C_2 , 而 L_2 的含量最低(10—20 cm 处为 11.46%; 20—30 cm 处为 8.00%)。 L_2 的 10—30 cm 土层团聚体稳定性远远低于 0—10 cm, 这

可能是因为侧柏+刺槐混交林的枯枝落叶层仅仅改善了表层土壤的团聚体结构, 再者林下草本植物的生物量较少, 根系分布较浅, 亦不能对深层土壤团聚结构起到改善作用。总体而言, 植被恢复短期内主要改善了表层土壤的团聚体组成, 而对深层土壤的改善作用可能较为有限。

3.3 不同林草植被恢复类型的土壤入渗特性

土壤饱和导水率(K_s)为反映土壤入渗能力的重要指标, K_s 越高, 土壤入渗性能越好, 更多的水分可以入渗到土壤中, 从而减小地表径流和侵蚀, 提高土壤蓄水能力和对植被的供水能力。

由表 3 得知,不同林草植被恢复类型的表层土壤入渗特性变异系数在 0.001~0.360 之间,除 L_2 外,都属于中等变异。 L_1 的 K_s (0.307 cm/min) 显著大于其他植被类型土壤,其次是 C_3 , C_2 , L_2 , 分别为 0.161 cm/min, 0.402 cm/min, 0.077 cm/min, 而 C_1 的 K_s 最小(0.044 cm/min)。这说明较之撂荒地,林草地显著提高了土壤入渗性能。



注: M_w 为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量。下同。

图 2 不同林草植被恢复类型的土壤 >0.25 mm 团聚体含量
Fig.2 Content of soil aggregates larger than 0.25 mm in different vegetation restoration types

3.4 土壤团聚体稳定性、入渗特性与土壤基本性质的相关性分析

团聚体稳定性指标 MWD , D , M_w 均与有机质含量呈现显著或极显著相关, 相关系数分别为 0.61, -0.68, 0.55; PAD 与有机质含量呈现负相关, 但相关性不显著。 MWD , GMD , PAD , D , M_w 均与容重、饱和含水率呈现极显著或显著相关。除 PAD , D 与孔隙度呈现显著的负相关(-0.71, -0.63)之外, GMD , MWD , M_w 与孔隙度均呈显著正相关(0.60, 0.63, 0.68)。团聚体稳定性指标与 pH 值、根系生物量没有显著的相关性。入渗指标 K_s 与土壤有机质、容重、饱和含水率、孔隙度均呈现显著或极显著的相关性(0.56, -0.67, 0.85, 0.79), 而与 pH 值、根系生物量的相关性不明显(见图 4)。这说明土壤有机质、容重、

饱和含水率、孔隙度均为影响团聚体稳定性和入渗特性的关键理化因子。

表 3 不同林草植被恢复类型的土壤入渗特性
Table 3 Soil infiltration characteristics in different vegetation restoration types

| 样地 | H_1 / cm | H_2 / cm | I_1 / ($cm \cdot min^{-1}$) | I_2 / ($cm \cdot min^{-1}$) | K_s / ($cm \cdot min^{-1}$) | 变异 系数 |
|-------|---------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|
| L_1 | 4.5 | 9.5 | 0.436 | 0.573 | 0.282 | 0.232 |
| | 5.0 | 9.5 | 0.571 | 0.740 | 0.387 | |
| | 4.0 | 9.0 | 0.369 | 0.491 | 0.251 | |
| L_2 | 5.0 | 10.0 | 0.229 | 0.266 | 0.077 | 0.001 |
| | 5.5 | 10.5 | 0.330 | 0.367 | 0.077 | |
| | 4.0 | 9.0 | 0.223 | 0.261 | 0.077 | |
| C_1 | 5.0 | 10.0 | 0.100 | 0.120 | 0.041 | 0.202 |
| | 5.0 | 10.0 | 0.438 | 0.464 | 0.054 | |
| | 5.4 | 10.4 | 0.182 | 0.200 | 0.037 | |
| C_2 | 4.5 | 9.5 | 0.789 | 0.871 | 0.170 | 0.360 |
| | 4.0 | 10.0 | 0.565 | 0.616 | 0.088 | |
| | 5.5 | 10.5 | 1.079 | 1.171 | 0.189 | |
| C_3 | 5.3 | 10.3 | 0.582 | 0.648 | 0.137 | 0.134 |
| | 5.6 | 10.6 | 0.659 | 0.739 | 0.166 | |
| | 5.7 | 10.7 | 0.314 | 0.401 | 0.179 | |

注: K_s 代表饱和导水率; I 是入渗速率; H_1 为低水头, 值在 5 cm 左右, H_2 为高水头, 值在 10 cm 左右, 对应的 I 分别为 I_1 和 I_2 , 即对应水头的稳定入渗率。下同。

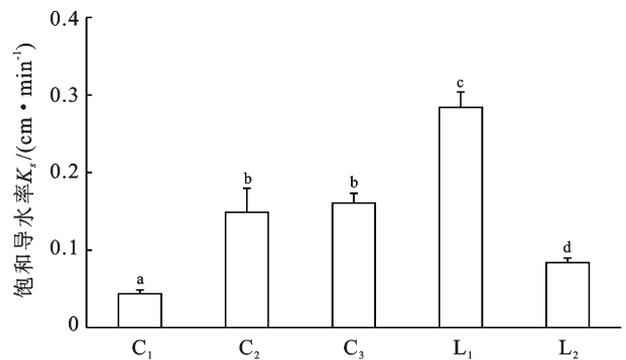


图 3 不同林草植被恢复类型的土壤饱和导水率
Fig.3 Soil saturated hydraulic conductivity in different vegetation restoration types

表 4 土壤团聚体、入渗特性和土壤基本性质之间的相关性

Table 4 Correlation among soil aggregates, infiltration characteristics and physicochemical properties

| 指标 | 有机质 | 容重 | 饱和含水率 | 孔隙度 | pH 值 | 根系生物量 |
|-------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| GMD | 0.48 | -0.64** | 0.70** | 0.60* | -0.19 | 0.06 |
| MWD | 0.61* | -0.80** | 0.79** | 0.63* | -0.01 | 0.01 |
| PAD | -0.27 | 0.55* | -0.73** | -0.71** | 0.41 | -0.10 |
| D | -0.68** | 0.72** | -0.77** | -0.63* | -0.11 | -0.22 |
| M_w | 0.55* | -0.71** | 0.77** | 0.68** | -0.09 | 0.12 |
| K_s | 0.56* | -0.67** | 0.85** | 0.79** | 0.04 | 0.21 |

注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平上呈显著相关; ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上呈极显著相关。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 不同林草植被恢复类型的团聚体稳定性差异。团聚体稳定性可反映土壤抵抗水力破坏的能力,受到多种理化因素的影响^[3-4,16-18]。本研究结果显示土壤有机质、容重与团聚体稳定性指标的关系密切。 L_1 (侧柏+油松混交林)的有机质含量高于 L_2 (侧柏+刺槐混交林), C_3 (天然草地)的有机质含量高于 C_2 (苜蓿地)、 C_1 (撂荒地),有机质被认为可以作为“胶结剂”与细小团聚体以多价阳离子为“键桥”而粘在一起,在团聚体稳定性中发挥着不可替代的作用^[19],因此不同植被类型的土壤团聚体稳定性表现为 $L_1 > L_2, C_3 > C_2 > C_1$ 。同一土层,较之容重大的紧实土壤,容重小的土壤往往其团聚体结构疏松、多孔^[20],稳定性更强,本研究中 L_1 容重小于 L_2, C_3 容重小于 C_2, C_1 ,因此不同植被恢复类型的团聚体稳定性表现情况与容重一致。

土壤表层(0—10 cm)是最先开始侵蚀的土层,因此表层土壤的团聚体稳定性对于保持水土、防止水土流失最为重要。就土壤表层而言,团聚体稳定性表现为 $L_1 > C_3 > L_2 > C_2 > C_1$,相关研究结果也表明林地的团聚体稳定性优于草地^[9-10,21]。本研究中 L_1 的土壤团聚体稳定性最佳,而 L_2 的土壤团聚体稳定性却不如 C_3 ,这可能是 L_2 (侧柏+刺槐混交林)的退耕年限较 L_1 (侧柏+油松混交林)短,其枯枝落叶层和林下草本植被残体对土壤团聚体结构的改善仍然需要一个前期时间。然而,也有其他人得出了不一致的结论,比如李阳芳等^[22]人在云南元阳梯田区的研究表明,当地土壤团聚体稳定性表现为荒草地>灌木林>有林地>坡耕地,这说明团聚体稳定性可能受到地理区域性气候、地形、土质等多种因素的影响。 C_1 撂荒地由于较低的植被覆盖度和有机质含量、较短的退耕时间,导致其团聚体稳定性不如苜蓿地、天然草地和林地,因此撂荒地土壤表层的侵蚀风险较高。

(2) 不同林草植被恢复类型的土壤入渗性能差异。土壤饱和导水率受土壤结构,尤其是土壤容重和孔隙度的影响,这已在大量研究中得到证实^[23-24]。本研究显示,土壤饱和导水率与土壤孔隙度、容重呈现显著的相关性(表 4),再次印证了前人的相关研究结果。其次,本研究发现土壤饱和导水率与土壤有机质呈正相关($p < 0.05$),这是因为土壤孔隙结构的形成离不开有机质和根系生物量,有机质主要来源于地上植物的凋落物及其腐烂的地下根系,可以促进团聚体的形成和稳定,而稳定的团聚体能够大大改善土壤的

孔隙结构,从而增强土壤的透水性、蓄水能力及通气性^[23,25],提高土壤入渗性能。本研究中,不同林草植被类型的土壤入渗性能表现为: $L_1 > C_3 > C_2 > L_2 > C_1$,说明林草植被较撂荒地显著提高了土壤入渗能力。然而,具有较高有机质含量的 L_2 土壤,并没有表现出较优的入渗性能,这可能与其退耕时间短、土壤孔隙度改善不大有关。 C_3 未受人为干扰,土壤孔隙度和有机质含量较好,团聚体结构较优,因此表现较优的入渗性能。 C_2 样地,虽其根系生物量大于 C_3 ,但由于苜蓿地在刈割过程中遭受频繁的人为践踏,致使土壤变得较为紧实,限制地表水分入渗至土壤。 C_1 在撂荒前为耕地,农耕器具的频繁扰动使得土壤较为紧实,对团聚体结构造成一定程度的破坏,进而可能破坏了原有的非毛管孔隙(优先流)/毛管孔隙通道,不利于地表水分入渗。

4.2 结论

(1) 0—30 cm 土层范围内, C_1 的 GMD 和 MWD 最低,林草植被恢复类型的 GMD、MWD 表现为 L_1 和 C_3 大于 L_2 和 C_2 ,而 PAD 和 D 则相反,较之撂荒地,林草植被恢复有助于改善团聚体结构稳定性。

(2) 0—10 cm 土层, L_1 的 >0.25 mm 水稳定团聚体含量最高,其次是 C_3 和 L_2, C_1 最低;而 10—30 cm 土层, C_3 的 >0.25 mm 水稳定团聚体含量最高, L_2 最低。较之撂荒地,林草地有助于提高 >0.25 mm 水稳定团聚体含量;林地短期主要改善了表层土壤团聚体组成,而对深层土壤团聚体组成改善较为有限。

(3) L_1 的 K_s (0.307 cm/min)最大, C_1 的 K_s (0.044 cm/min)最小,不同林草植被恢复类型的表层土壤入渗特性变异系数均介于 0.001~0.360。较之撂荒地,林草植被恢复有助于提高土壤的入渗特性。

(4) 团聚体稳定性指标与有机质(PAD 除外)、孔隙度、容重呈现显著或极显著相关,有机质、孔隙度和容重对 K_s 的影响较大。有机质、容重、孔隙度可能是影响团聚体稳定性和入渗特性的关键理化因子,另外植被恢复时间的长短也可能产生影响。

[参 考 文 献]

- [1] 高云飞,张栋,赵帮元,等.1990—2019 年黄河流域水土流失动态变化分析[J].中国水土保持,2020(10):64-67.
- [2] 张雅茜,方晰,洗应男,等.亚热带区 4 种林地土壤微生物量碳氮磷及酶活性特征[J].生态学报,2019,39(14):5326-5338.
- [3] Nsabimana G, Bao Yuhai, He Xiubin, et al. Soil aggregate stability response to hydraulic conditions in water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Catena, 2021,204:105387.

- [4] 胡昭,张懿,郭建.黄土丘陵区典型林地土壤团聚体稳定性评价[J].人民黄河,2020,42(8):104-108.
- [5] 王紫薇,邵明安,黄来明,等.青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和导水率分布及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(3):150-155.
- [6] 冯璐.黄土丘陵沟壑区撂荒草地土壤性质变化特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [7] 海龙,姚拓,张春红,等.黄土丘陵沟壑区不同年限苜蓿地土壤水稳性团聚体分布特征及稳定性研究[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):51-56.
- [8] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [9] Liu Yifan, Liu Yu, Shi Zhihua, et al. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau [J]. *Catena*, 2020,195:104787.
- [10] Zeng Quanchao, Darboux F, Man Cheng, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China) [J]. *Catena*, 2018,167:276-283.
- [11] 赵克昌,屈连宝.兰州南北两山植被恢复策略[J].中国沙漠,2006,26(3):493-497.
- [12] 李娟.基于 GIS 和 RS 的兰州市南北两山植被覆盖动态变化研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2009.
- [13] 王润泽,谌芸,李铁,等.紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J].水土保持学报,2018,32(2):210-216.
- [14] 邱陆畅,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.
- [15] Nimmo J R, Schmidt K M, Perkins K S, et al. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization [J]. *Vadose Zone Journal*, 2009,8(1):142-149.
- [16] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.
- [17] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.
- [18] Abbas F, Zhu Zhaolong, An Shaoshan. Evaluating aggregate stability of soils under different plant species in Ziuling Mountain area using three renowned methods [J]. *Catena*, 2021,207:105616.
- [19] Wu Xinliang, Cai Chongfa, Wang Jinguang, et al. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,157:11-22.
- [20] 王辉,王全九,邵明安.表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):10-13.
- [21] 刘旦旦,张鹏辉,王健,等.黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J].林业科学,2013,49(9):102-106.
- [22] 李阳芳,宋维峰,和俊,等.元阳梯田核心区不同土地利用类型土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2012,19(6):54-57.
- [23] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报,2021,41(3):8-14.
- [24] 刘畅,张建军,张海博,等.晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J].水土保持学报,2021,35(5):101-107.
- [25] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.

(上接第 7 页)

- [21] 宋科,秦秦,郑宪清,等.水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果[J].水土保持学报,2021,35(3):83-89.
- [22] 缪杰杰,刘运峰,胡宏祥,等.不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):86-93.
- [23] 黄薇,王冬梅,李平,等.青海高寒区典型植被地表径流及氮磷流失特征[J].农业工程学报,2021,37(13):92-100.
- [24] 刘晓燕,张国珍.中国水环境非点源污染负荷的估算研究[J].环境科学与管理,2007,32(6):63-66.
- [25] 华锦欣,王克勤,张香群,等.昆明松华坝水源区等高反坡阶对坡耕地土壤磷含量的影响研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(3):76-81.
- [26] 华锦欣,王克勤,张香群,等.等高反坡阶对松华坝水源区弃荒地植被恢复的初期影响[J].西南林业大学学报,2016,36(3):116-120.
- [27] 武军,王克勤,华锦欣.松华坝水源区等高反坡阶对坡耕地雨季土壤水分空间分布的影响[J].水土保持通报,2016,36(1):57-60.
- [28] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [29] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany: A meta-analysis [J]. *Geomorphology*, 2009,111(3/4):182-193.
- [30] 钟雄,张丽,张乃明,等.滇池流域坡耕地土壤氮磷流失效应[J].水土保持学报,2018,32(3):42-47.
- [31] 陈开放.不同降雨和施肥条件下茶园坡地地表径流和壤中流氮磷流失通量研究[D].河南 郑州:郑州大学,2020.
- [32] 王军,魏飒,刘凤婵,等.坡耕地降雨径流与土壤侵蚀特征研究[J].河北农业科学,2021,25(4):88-92.