

坝上草原鱼鳞坑生态修复措施的水土保持效应

王岚园, 王一宁, 任泳宁, 黄凌冰, 孙雨润, 战金艳, 刘世梁, 谢 湑

(北京师范大学 环境学院/水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: [目的] 探究不同位置鱼鳞坑的水土保持效果, 确定合理的鱼鳞坑布置原则, 为生态脆弱区鱼鳞坑选址与效果评估提供实证研究。[方法] 以坝上草原干松坝为研究区, 在阴坡、阳坡和河谷分别设置样地, 对比鱼鳞坑区和对照区的水土状况, 分析不同位置鱼鳞坑对生物量、土壤容重、根系层和土壤养分的影响。[结果] ① 阳坡、阴坡、河谷的鱼鳞坑均增加了地上生物量、地下生物量、根系深度、TN 含量, DOC 等指标, 降低了土壤容重。② 阴坡、阳坡、河谷的鱼鳞坑水土保持效果差异较大; 阴坡、阳坡鱼鳞坑均能显著增加植被的根系深度 ($p < 0.05$) (阴坡 104.19%, 阳坡 42.87%), 而阴坡鱼鳞坑对土壤容重、TN 含量、地上生物量的影响更显著 ($p < 0.05$) (分别减少 9.26%, 增加 148.05%, 增加 136.32%); 河谷鱼鳞坑能显著增加土壤氨氮和硝态氮 ($p < 0.05$) (125.16%, 174.53%)。③ 鱼鳞坑位置、修建时间对水土保持指标影响较大, 坡位的影响较小; 随着鱼鳞坑修建时间的增长, 地上地下生物量、TN 含量、根系深度增加, 土壤氧化还原电位降低。④ 土壤侵蚀严重地区的鱼鳞坑水土保持效果更显著。[结论] 鱼鳞坑水土保持效果显著, 阴坡鱼鳞坑效果较阳坡显著, 河谷鱼鳞坑提高土壤氨氮和硝态氮的效果较阴坡、阳坡显著, 且随着鱼鳞坑修建时间增长, 水土保持效果增强。应因地制宜地在阴坡、河谷修建鱼鳞坑, 以增强鱼鳞坑的水土保持效果。

关键词: 坝上草原; 干松坝; 鱼鳞坑; 微地形修复; 水土流失; 土壤养分流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0089-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 王岚园, 王一宁, 任泳宁, 等. 坝上草原鱼鳞坑生态修复措施的水土保持效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 89-97. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.012; Wang Lanyuan, Wang Yining, Ren Yongning, et al. Effects of ecological restoration measures of fish-scale pit on soil and water conservation in Bashang grassland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 89-97.

Effects of Ecological Restoration Measures of Fish-scale Pit on Soil and Water Conservation in Bashang Grassland

Wang Lanyuan, Wang Yining, Ren Yongning,

Huang Lingbing, Sun Yurun, Zhan Jinyan, Liu Shiliang, Xie Tian

(School of Environment, State Key Laboratory of Water

Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The effects of fish-scale pits at different locations on soil and water conservation were studied in order to define underlying layout principles for fish-scale pits, and to provide information for fish-scale pit site selection and effect evaluation in ecologically fragile areas. [Methods] The study was conducted at Qiansongba in the Bashang grassland area. Plots were established in shady slope, sunny slope, and river valley areas. The effects of fish-scale pits on plant biomass and root system, soil bulk density, and soil nutrient loss were determined. [Results] ① Aboveground biomass, underground biomass, rooting depth, total nitrogen (TN) and dissolved organic carbon were increased for fish-scale pits on the sunny slope, shady slope, and river valley, and the soil bulk density was decreased compared with a control area. ② The effects of fish-scale pits on shady slope, sunny slope, and river valley locations were different. Fish-scale pits on the shady slope and sunny slope significantly increased rooting depth ($p < 0.05$) (104.19% and 42.87%, respectively).

收稿日期: 2022-05-04

修回日期: 2022-09-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“‘三北’防护林工程坝上段生态效率评估”(41771546)

第一作者: 王岚园(2001—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 北京师范大学环境学院本科毕业, 现为清华大学地球系统科学博士研究生, 研究方向为草原植物群落。Email: lanyuanw@163.com。

通信作者: 谢湑(1988—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 博士, 副教授, 主要从事生态保护与修复方面的研究。Email: tianxie@bnu.edu.cn。

Compared with fish-scale pits at the sunny slope, fish scale pits at the shady slope also had significant effects on soil bulk density, TN content, and aboveground biomass ($p < 0.05$) (-9.26% , 148.05% , and 136.32% , respectively). Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen for the fish-scale pit at the river valley location were significantly higher than for the control group ($p < 0.05$) (125.16% and 174.53% , respectively). ③ Fish-scale pit location and construction time were the most important factors influencing soil and water conservation, rather than slope position. As fish-scale pit construction time increased, aboveground biomass, underground biomass, TN content, and rooting depth increased, and soil redox potential decreased. ④ The effects of fish-scale pits on soil and water conservation in areas with severe soil erosion was more significant than in areas with less erosion. [Conclusion] Fish-scale pits produced significant soil and water conservation effects. The fish-scale pit on the shady slope had more significant soil storage and soil conservation effects than the fish-scale pit on the sunny slope. The fish-scale pit in the river valley had a greater ability to improve soil ammonia and nitrate nitrogen levels than the shady slope and sunny slope pits. Soil and water conservation was enhanced with the increase of construction time of fish-scale pits. In order to improve soil and water conservation effects, fish-scale pits should be built on shady slopes and in river valleys according to local conditions.

Keywords: Bashang grassland; Qiansongba; fish-scale pit; micro-topography restoration; water and soil loss; soil nutrient loss

近 20 a 来,水资源短缺、水土流失、生态环境退化等问题日益突出,生态文明建设越发重要。国务院《关于加快推进生态文明建设的意见》明确指出,当前是大力建设生态文明的关键时期,水土保持在生态文明建设中占有重要地位与作用,探究脆弱生态系统的生态修复措施及其修复效果已成为目前热门的研究方向。河北坝上地区位于内蒙古高原—燕山山地—华北平原交界地带,其水土保持影响京津冀地区的生态安全^[1]。因气候变化和人类活动,生态脆弱的坝上地区^[2]生态风险水平升至为高风险级,且近 40 a 来高风险区增加了 122.2 km^2 ^[3]。为全面遏制生态退化,自 2013 年起,坝上地区建设了众多水土保持工程,而以鱼鳞坑生态修复措施为代表的坡改梯整地措施已成为坝上重要的水土保持手段。鱼鳞坑是保持水土的微地形构建方法,通过在坡面挖掘的半月型坑,拦蓄地表径流,利用坑内植被实现蓄水保土。丰宁县千松坝森林公园(下文简称“千松坝”)地处坝上高原与冀北山地的交汇处,修建了大面积鱼鳞坑工程。截至 2019 年,其包括鱼鳞坑在内的人工造林达到 599.2 km^2 ,覆盖了广大草原地区,研究其水土保持效果具有实际价值。近年来,鱼鳞坑生态修复工程因其水土保持效果备受关注。有研究表明,鱼鳞坑比封育草地土壤含水率高 10% 左右,鱼鳞坑能一定程度提高土壤蓄水能力^[4];且鱼鳞坑在减流减沙、减少养分流失方面效果明显^[5]。对黄土高原的研究表明,种植灌木或乔木的鱼鳞坑有较强的蓄水保土能力^[6],但坝上生态环境不同于黄土高原,其效果有待进一步探究。许多研究通过中试控制试验表明^[5],鱼鳞坑

能够一定程度上抑制土壤侵蚀、减少养分流失^[7],但控制试验可能缺乏真实性,这就需要在实施工程的生态脆弱区进行实地试验。另外,已有研究表明不同坡长、不同树种的鱼鳞坑效果存在差异^[8],但对不同位置(阳坡、阴坡、河谷等)、不同坡位(坡底、坡中、坡顶)鱼鳞坑的水土保持效果,尚缺乏有效的实证研究。因此,本研究选取千松坝的鱼鳞坑修复区为研究区,基于土壤侵蚀状况的计算,核算不同土壤侵蚀状况下鱼鳞坑对生物量、容重、根系层和土壤养分的影响,将实地采样与试验探究相结合,以确定鱼鳞坑布置原则,为生态脆弱区鱼鳞坑选址与效果评估提供科学支撑。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

坝上草原总面积 $18\,214 \text{ km}^2$,平均海拔 $1\,500 \text{ m}$ 左右,属于典型的农牧交错区和森林草原交错区。该地区季风气候和大陆性气候交汇,具有典型的气候敏感性和生态脆弱性^[9],年平均气温约 $1.4\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$,无霜期 $80\sim 110 \text{ d}$,年降水量 400 mm 左右^[10]。其以禾本科植物和多年生草本植物为主,形成草甸草原和干草原。目前坝上地区鱼鳞坑的主要种植树种为樟子松(*Pinus sylvestris*)、云杉(*Picea asperata*)、落叶松(*Larix gmelinii*)等^[11]。

在坝上草原选取河北省承德市丰宁县千松坝($116^\circ 6' 30''\text{E}$ — $116^\circ 11' 30''\text{E}$, $41^\circ 31' 15''\text{N}$ — $41^\circ 33' 45''\text{N}$)为研究区。研究区内鱼鳞坑于 2017—2019 年构建,种植树种为单一树种樟子松。由于种植时间较短,樟子

松均约 0.5 m 高,平均盖度约 90%。同时,实地采样发现研究区鱼鳞坑尺寸比较统一,其平均基坑高度 18.33 ± 0.38 cm,平均基坑宽度 91.31 ± 1.57 cm,平均横向间距和纵向间距分别为 2.86 ± 0.11 cm 和 2.84 ± 0.11 cm。由于研究区远离市区,人口稀少,且鱼鳞坑有围栏保护,受人类、牲畜影响少,在研究其保持水土效果时可以排除其他因素干扰。

1.2 材料与方法

1.2.1 样品采集

实地采样于 2021 年 8—9 月进行,在研究区按照随机性原则选取 5 个样地:2 个修建时间不同的阴坡样地(2017 年和 2019 年),2 个修建时间不同的阳坡样地(2017 和 2019 年)和 1 个河谷样地(2019 年)。在各样地中,从坡底到坡顶布设三条有鱼鳞坑的试验样线和一条无鱼鳞坑的对照样线,各样线之间间隔 5~10 m。在每条样线上布设 3 个样点(分别位于坡底、坡中、坡顶),同一坡位的样点位于同一海拔梯度,保证试验样点与对应的对照样点在同一海拔。由于研究区植被均匀且为草本植物,根据样方面积曲线,确定在每个样点设置 3 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的样方,共计 180 个样方,保证数据的全面性和准确性。在采样时,记录每个样点鱼鳞坑的坡位(坡底、坡中、坡顶)、位置(阴坡、阳坡、河谷),并使用钢卷尺测量鱼鳞坑尺寸和鱼鳞坑的间距,用氧化还原电位仪(TR-901,上海雷磁)原位测定土壤的氧化还原电位。另外,用铲子挖开土层至根系层底部,用钢卷尺垂直于地面测量样点的根系层可达深度即为根系深度,按照随机性原则利用“环刀法”在每个样方中采集土壤表层土样 1 个,并用“全株收获法”采集样方植被。本研究中“环刀法”参照《土壤容重测定标准(NY/T1121.4-2006)》,使用内壁事先涂好凡士林的 200 cm^3 环刀切割未搅动的自然状态土样,之后将土样放置于烘箱内在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘 72 h 至恒重,计算单位容积的烘干土质量即为容重^[12],并测定土壤含水率(WC)。使用元素分析仪(JY/T017-1996)测定土壤样品的总碳(TC)和总氮(TN),并使用总有机碳分析仪(TOC-L)测得土壤溶解性有机碳(DOC),分别采用纳氏试剂分光光度法(HJ535-2009)、紫外分光光度法(HJ/T346-2007)测定土样中氨氮和硝态氮。把植被带回实验室后将其地上和地下部分剪开

(以茎基部为地上、地下分界线),清洗地下部分,将两部分分别装入编号的纸袋,置于 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,得到地下生物量^[13-14]。

1.2.2 土壤侵蚀模数计算

本文通过计算土壤侵蚀模数,描述不同土地利用类型的土壤侵蚀状况,并将阴阳坡样地的鱼鳞坑水土保持数据与其土壤侵蚀程度进行对比。其中,土壤侵蚀模数(A)的计算采用中国通用土壤侵蚀方程 CSLE:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中:A 为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; K 是土壤可蚀性因子 $[\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; B 为植被覆盖度与生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。之后将侵蚀模数计算结果按照《土壤侵蚀强度分级标准表(SL190-96)》进行分类。

对于公式(1)中参数的计算,本文中 R 作为降雨侵蚀力因子,利用国家青藏高原科学数据中心发布的中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2020 年)^[15]计算得到。K 作为土壤可蚀性因子,根据《生产建设项目土壤流失量测算导则(SL773-2018)》,可得丰宁县 K 值取 $0.015 (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MJ})/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。L 和 S 因子(图 1D)根据 ALOS 高程数据(12.5 m 分辨率)计算得到。E 因子因具体工程的范围不明,取值为 1。T 因子根据解译获得的耕作措施轮作区代码,得到研究区属于后山坝上晋北高原山地半干旱喜凉作物一熟区,故取值 0.488。

公式(1)各个参数中,生物措施因子 B 计算相对复杂,利用 Modis Landsat 8 OLI 数据进行非监督分类得到土地利用类型(图 1b),再依据不同土地利用类型进行赋值计算。依据《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》,计算公式为:

$$B = \sum_i^n (\text{SLR}_i \cdot \text{WR}_i) \quad (2)$$

式中:SLR_i 为第 i 个时段的生物措施因子; WR_i = $R_i / \sum_i^n R_i$ 为第 i 个时段的降雨侵蚀力占全年降水侵蚀力比例,本研究按照非生长季和生长季两个季度进行计算,取 n=2。对于上式中 SLR 的取值,按照如下公式计算:

$$\text{SLR} = \begin{cases} 0.444 \ 68 \times e^{3.200 \ 96 \times \text{GD}} - 0.040 \ 99 \times e^{\text{FVC} - \text{FVC} \times \text{GD}} + 0.025 & (\text{林地、疏草地}) \\ 1/(1.176 \ 47 + 0.862 \ 42 \times 1.059 \ 05^{100 \times \text{FVC}}) & (\text{灌草地}) \\ 1/(1.25 + 0.788 \ 45 \times 1.059 \ 68^{100 \times \text{FVC}}) & (\text{草地}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:FVC 为植被覆盖度,取值 0~1; GD 为乔木林下

盖度,按照经验取值 0.4。对于上式中 FVC 的计算,我

们利用大气校正和辐射校正后的 Modis Landsat 8OLI 数据进行计算。首先计算归一化植被指数 (NDVI), 计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (4)$$

式中: NIR 为近红外波段的反射值; R 为红光波段的反射值;

再根据像元二分模型^[16]将得到的 NDVI 数据反演为 FVC, 计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (5)$$

式中: $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值, 本研究中取 NDVI 最小值; $NDVI_{veg}$ 为完全覆盖植被像元的 NDVI 值, 本研究中取 NDVI 最大值。因此实际计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (6)$$

1.2.3 数据统计 采用柯尔莫可洛夫—斯米洛夫 Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0.05$) 方法检验数据正态性, 依据检验后数据是否呈正态分布使用不同的分析方法; 正态数据使用单因素方差分析 (one-way ANOVA, $\alpha = 0.05$), 非正态数据使用 Kruskal-Wallis 检验 ($\alpha = 0.05$) 和多重分析。由于本研究数据经过验证均呈正态分布, 因此都采用单因素方差分析。位置、坡位、种植时间对水土保持效果 (地上地下生物量、土壤容重、土壤含水率、根系深度、TC 值、TN 值、DOC 值、氨氮、硝态氮、氧化还原电位) 的影响程度采用冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 进行解析。其中单因素方差分析在 SPSS 22 统计分析软件中实现 (SPSS Inc, Chicago, USA), RDA 分析在 Canoco for Windows 5.0 软件中实现 (Microcomputer Power, New York, USA)。本研究使用 ENVI 5.3 软件对土地利用类型进行非监督分类, 并使用 OriginPro 2021, ArcGIS 10.7, ENVI 5.3 软件绘制图片。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤侵蚀情况

通过土壤侵蚀模数的计算, 对研究区不同土地利用类型的整体土壤侵蚀状况进行描述。如图 1 所示, 研究区的土地利用类型主要包括林地、灌草地、草地、农田等; 林地主要分布于海拔较高的山坡, 草地和农田主要分布于河谷地区, 灌草地位于二者之间的过渡地带。利用 ArcGIS 在每个采样区随机获取 50 个采样点, 得到阳坡平均侵蚀模数为 $5.36 \pm 0.08 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 其中阳坡两个样地侵蚀模数分别为 $4.80 \pm 0.08 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $5.91 \pm 0.04 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 阴坡平均侵蚀模数为 $26.40 \pm 0.31 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 其中两个样地侵蚀模数分别为 $6.41 \pm 0.09 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $46.37 \pm 0.83 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 河谷平均侵蚀模数为 $12.81 \pm 0.16 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。由上述数据和图 1 可知, 研究区土壤侵蚀状况主要为轻度和中度侵蚀, 且利用类型为农田、疏草地的河谷、阴坡地区侵蚀较阳坡更加严重, 且坡度较大的山坡及山顶侵蚀严重。鱼鳞坑构建在山坡河谷的草地、疏草地地区以及农田地区的周围, 这些地区土壤侵蚀较为严重。

2.2 鱼鳞坑构建对生物量的影响分析

对于地上、地下生物量, 在阴坡、阳坡、河谷地区, 有鱼鳞坑的试验组地上、地下生物量平均值较高 (图 2, 表 1)。对于阴坡 (表 1), 有鱼鳞坑的试验组地上生物量 $215.74 \pm 134.51 \text{ g}$ 显著大于无鱼鳞坑的对照组 $91.29 \pm 32.38 \text{ g}$, 有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组地上生物量增加 136.32%, 其显著性水平为 $0.020 (p < 0.05)$, 而有无鱼鳞坑对地下生物量无显著性影响; 对于河谷, 有鱼鳞坑的试验组地上生物量 $113.97 \pm 29.63 \text{ g}$ 大于无鱼鳞坑的对照组 $65.43 \pm 5.51 \text{ g}$, 有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组地上生物量增加 74.18%, 其显著性水平为 $0.068 (p < 0.1)$, 而有无鱼鳞坑对地下生物量无显著性影响; 阳坡中有无鱼鳞坑的地上和地下生物量无显著性差异。

表 1 研究区生物和土壤指标的平均水平

Table 1 Average levels of biological and soil indicators in study area

项目	地上生物量/g	地下生物量/g	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	根系 深度/cm	TN 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TC 含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	DOC 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
阴坡	有鱼鳞坑组	215.74±29.35**	171.29±27.48	1.47±0.02**	17.52±1.99**	14.66±2.55**	35.93±7.50	11.10±1.10	23.81±3.34	14.08±2.62*
	无鱼鳞坑组	91.29±13.22**	150.76±42.77	1.62±0.08**	8.58±1.03**	5.91±3.38**	53.13±22.90	8.45±1.19	32.91±3.14	25.25±6.58*
阳坡	有鱼鳞坑组	126.85±16.27	203.16±44.01	1.35±0.06	16.43±1.01*	9.48±1.67	50.26±5.38	8.03±0.85	25.90±2.67	14.54±2.37*
	无鱼鳞坑组	104.29±15.19	165.81±41.96	1.40±0.06	11.50±1.59*	5.88±2.29	71.91±11.37	6.23±0.72	29.12±2.18	18.92±5.35*
河谷	有鱼鳞坑组	113.97±17.11*	136.69±26.39	1.55±0.03	16.83±1.34**	7.03±2.76	82.01±13.31*	19.17±5.43*	67.99±2.07**	44.24±6.62**
	无鱼鳞坑组	65.43±3.18*	102.06±39.95	1.59±0.03	11.17±1.56**	0.05±0.00	15.73±10.98*	6.62±1.00*	30.21±3.34**	16.12±3.08**

注: 数值为平均值±标准误差; **, * 分别表示在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.1$ 水平差异显著。下同。

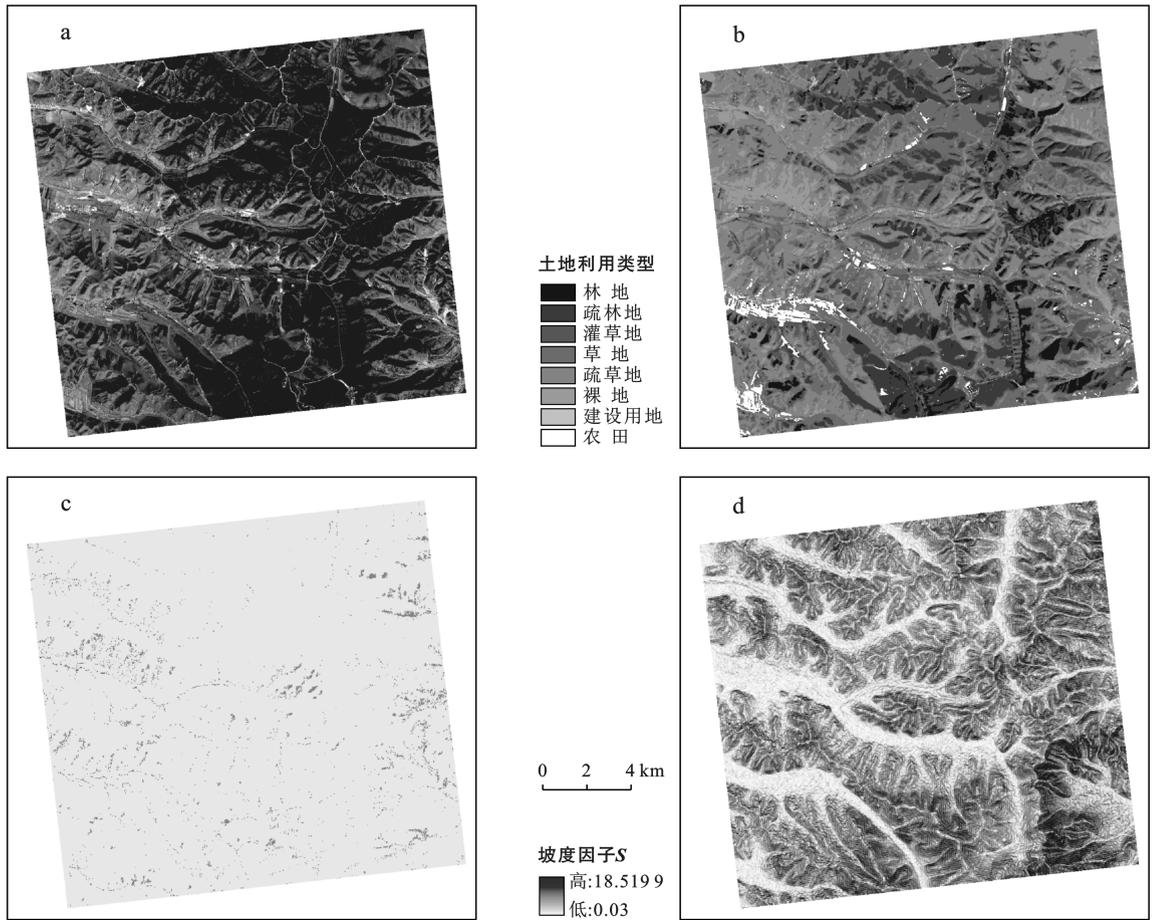


图 1 研究区的遥感影像(a)、土地利用类型(b)、土壤侵蚀程度(c)和坡度因子 S (d)的分布

Fig.1 Remote sensing images (a), land use type (b), degree of soil erosion (c) and slope factor S (d) in study area

2.3 鱼鳞坑的构建对土壤要素和根系状况影响

对于土壤容重,有鱼鳞坑的试验组平均值均低于无鱼鳞坑的对照组(图 2,表 1)。阴坡有鱼鳞坑的试验组土壤容重 $1.47 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 显著低于无鱼鳞坑的对照组 $1.62 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$,有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组土壤容重减少 9.26%,其显著性水平为 0.039 ($p < 0.05$);在阳坡和河谷地区,有无鱼鳞坑对土壤容重无显著影响。对于根系深度,在阴坡、阳坡、河谷地区,有鱼鳞坑的试验组平均值均高于无鱼鳞坑的对照组(图 2,表 1)。对于阴坡,有鱼鳞坑的试验组根系深度 $17.52 \pm 1.99 \text{ cm}$ 显著高于无鱼鳞坑的对照组 $8.58 \pm 1.03 \text{ cm}$,有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组根系深度增加 104.19%,其显著性水平为 0.017 ($p < 0.05$);对于阳坡,有鱼鳞坑的试验组根系深度 $16.43 \pm 1.01 \text{ cm}$ 显著大于无鱼鳞坑的对照组 $11.50 \pm 1.59 \text{ cm}$,有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组根系深度增加 42.87%,其显著性水平为 0.011 ($p < 0.05$);对于河谷,有鱼鳞坑的试验组根系深度 $16.83 \pm 1.34 \text{ cm}$ 大于无鱼鳞坑的对照组 $11.17 \pm 1.56 \text{ cm}$ ($p = 0.100$),但无较强显著性。

2.4 鱼鳞坑构建对土壤营养物质的影响

由图 2 可以看出,对于 TC,河谷地区有鱼鳞坑试验组的 TC 高于无鱼鳞坑对照组,阴坡、阳坡恰好相反,并且 3 种位置 TC 的差异都不显著。对于 TN,阴坡、阳坡、河谷有鱼鳞坑的试验组 TN $14.66 \pm 2.55 \text{ g/kg}$ 高于无鱼鳞坑的对照组 $5.91 \pm 3.38 \text{ g/kg}$,阴坡有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组 TN 增加 148.05%,其显著性水平为 0.048 ($p < 0.05$)(图 2)。

对于 DOC(如图 3 所示),在阴坡、阳坡、河谷地区,有鱼鳞坑试验组的 DOC 平均值均高于无鱼鳞坑的对照组,但无显著性差异。对于氨氮(如图 4 所示),在河谷地区,有鱼鳞坑的试验组氨氮 $67.99 \pm 2.07 \text{ mg/kg}$ 大于无鱼鳞坑的对照组 $30.21 \pm 3.34 \text{ mg/kg}$,有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组氨氮增加 125.16%,其显著性水平为 0.005 ($p < 0.05$);对于硝态氮,在河谷地区,有鱼鳞坑试验组硝态氮 $44.24 \pm 6.62 \text{ (mg/kg)}$ 大于无鱼鳞坑对照组 $16.12 \pm 3.08 \text{ mg/kg}$,有鱼鳞坑组比无鱼鳞坑组硝态氮增加 174.53%,其显著性水平为 0.025 ($p < 0.05$)。

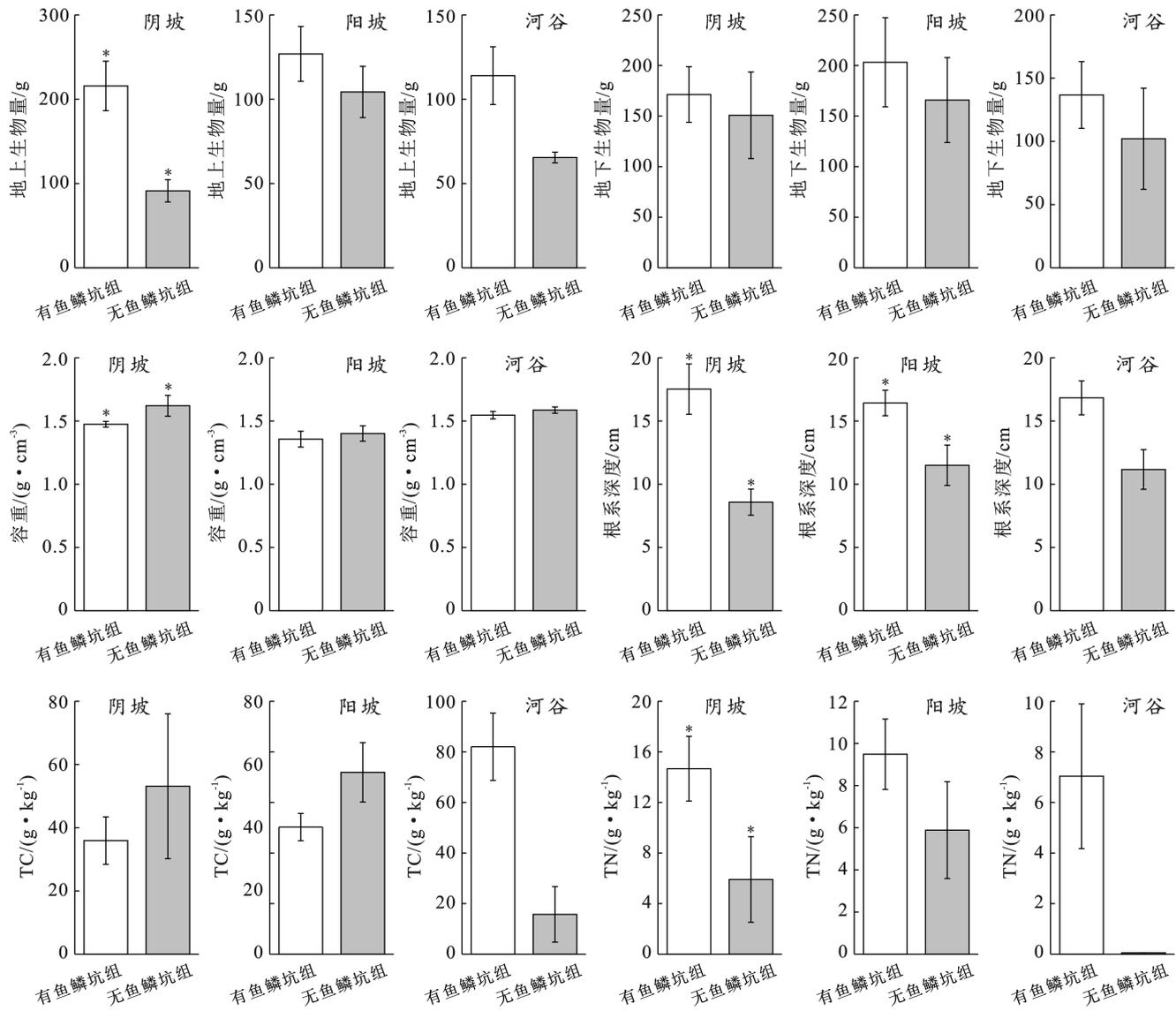


图 2 试验组(有鱼鳞坑)与对照组(无鱼鳞坑)地上生物量、地下生物量、土壤容重、根系深度、TC 和 TN 的差异性分析

Fig.2 Difference analysis of aboveground biomass, underground biomass, soil bulk density, root depth, TC and TN between experimental group (with fish-scale pits) and control group (without fish-scale pits)

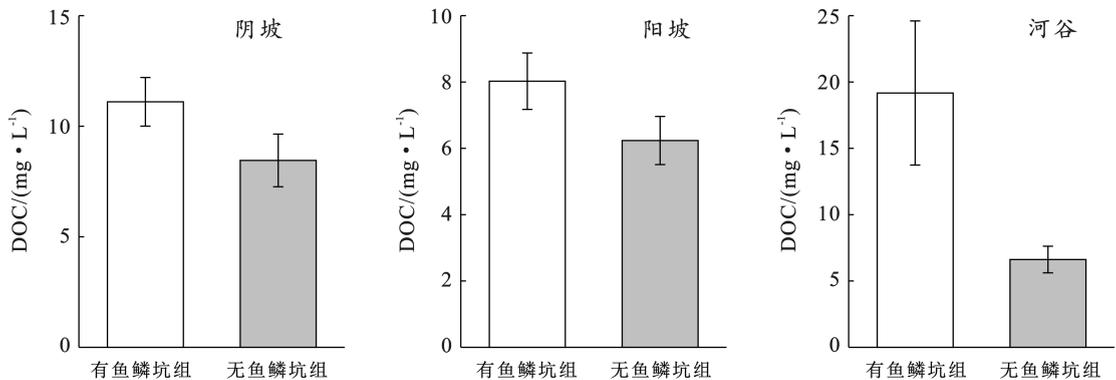


图 3 试验组(有鱼鳞坑)与对照组(无鱼鳞坑)的 DOC 的差异性分析

Fig.3 Difference analysis of DOC between experimental group (with fish-scale pits) and control group (without fish-scale pits)

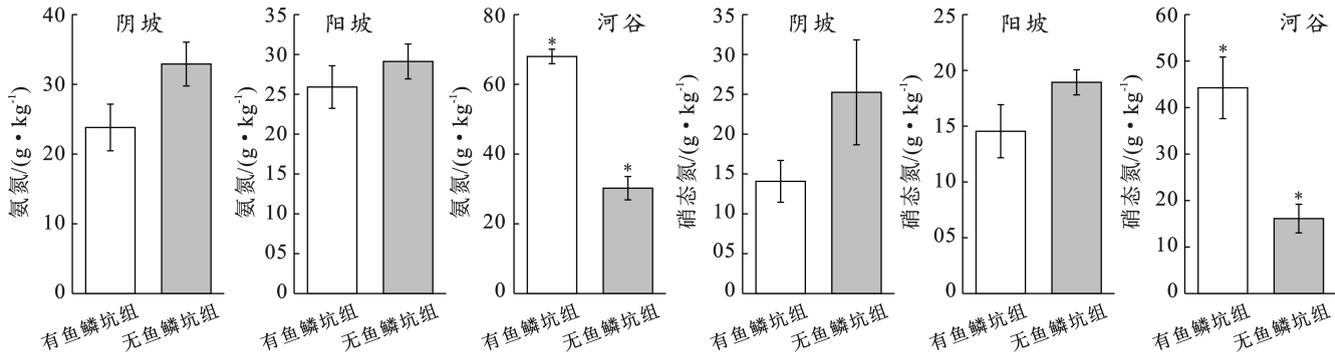


图 4 试验组(有鱼鳞坑)与对照组(无鱼鳞坑)的氨氮和硝态氮的差异性分析

Fig.4 Difference analysis of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen between experimental group (with fish-scale pits) and control group (without fish-scale pits)

2.5 水土保持指标与鱼鳞坑坡位、种植时间与位置的 RDA 分析

如图 5 所示,通过 RDA 冗余分析,探究鱼鳞坑坡位、种植时间(即为鱼鳞坑修建时间)和位置对水土保持指标(包括地上生物量、地下生物量、容重、土壤含水率、氧化还原电位、根系深度、TC 值、TN 值、DOC 值、氨氮、硝态氮)的影响程度。11 种水土保持指标计算形成的轴 1 和轴 2 可以解释坡位、种植时间与位置 3 种指标的 66.48% 和 90.27%。在 RDA 分析图中,箭头的长度表示该环境因子对水土保持指标的影响程度,箭头的长度越长,表示环境因子影响越大。

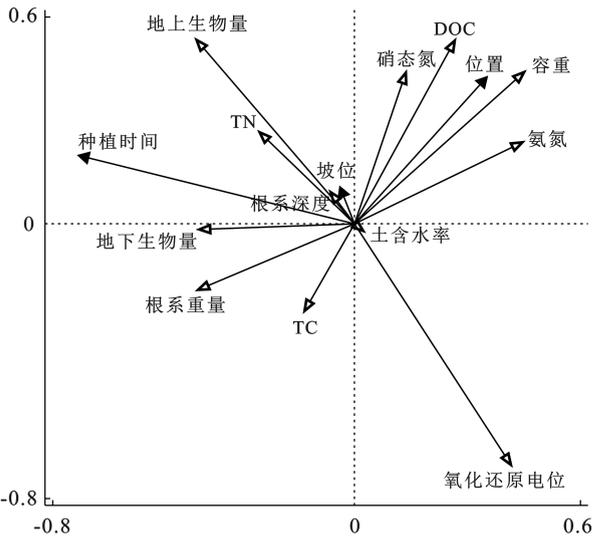


图 5 水土保持指标与鱼鳞坑坡位、种植时间与位置的 RDA 结果

Fig.5 RDA results of soil and water conservation index and slope position, planting time and location of fish-scale pits

由图 5 可知,水土保持效果的主要影响因素是种植时间和位置,坡位对植被指标影响较小。11 种水土保持指标与鱼鳞坑坡位、种植时间与位置的相关性

存在着较大差距:容重、DOC 值、氨氮、硝态氮与位置呈正相关关系,且 4 种指标主要受到位置的影响,均呈现出“河谷>阴坡>阳坡”的分布规律;地上生物量、地下生物量、TN、根系深度与种植时间呈正相关关系,即随着种植时间的增加,4 种指标数值增加;氧化还原电位与种植时间呈负相关关系,即随着种植时间的增加,土壤的氧化还原电位降低;地上生物量、根系深度、TN,DOC 值、氨氮、硝态氮均与坡位呈正相关关系,从坡顶到坡底这 6 种指标呈较不显著的上升趋势。

3 讨论

3.1 地形因素对鱼鳞坑生态效应的影响

近年来,许多研究对坝上草原 TN,TC 等土壤植被指标进行采样,本研究采样得出的 TC,TN 等土壤指标与王丽梅等^[17]的研究结果数量级相同。本研究表明不同位置的鱼鳞坑均一定程度上增加了地上地下生物量、根系深度、TN 值、DOC 值等指标,降低了土壤容重。李金峰等^[18]研究表明,土壤有机质、TN 值、TC 值、土壤容重是关键理化因素,很大程度上反映土壤结构与养分循环。李茂萍等^[19]研究表明生物量、根系深度、TN 值、DOC 值增加是土壤质量提高、植物保持水土能力增强的体现,土壤容重下降也是土壤有机质多、孔隙多、结构好的表征。刘鹤龄等^[20]研究表明,乔木(樟子松等)覆盖的鱼鳞坑土壤有机碳含量(27.9 g/kg)高于无鱼鳞坑(21.9 g/kg),并且陈晓光等^[21]研究表明鱼鳞坑修建后生物量、根系深度、TN 值、DOC 值等指标均大于无鱼鳞坑,这些研究结果与本文结果具有一致性。同时,宿婷婷等^[22]研究表明,鱼鳞坑处理后的土壤容重显著降低,与本研究结果具有相似性。究其原因,刘鸿涛^[23]研究表明鱼鳞坑既能使土壤总储水量增加 19.98%,实现蓄水保土^[24-25],

又可以促进樟子松的生长^[26]。另外,董一桥等^[27]研究表明,人类践踏会导致土壤紧实,造成土壤容重增加。因此鱼鳞坑能降低土壤容重,还可能是围栏减轻了踩踏、放牧等胁迫影响。虽然大多数指标表明鱼鳞坑能够保持水土,但本研究发现,在阳坡、阴坡,鱼鳞坑对土壤总磷、氨氮和硝态氮无显著影响,有鱼鳞坑条件下的土壤营养反而较低。由于本研究针对表层土壤,刘鸿涛^[23]研究表明鱼鳞坑使表土层土壤有机质减少 1.99 g/kg,土壤碳储量减少 15.90 t/hm²,使深层砂岩层土壤有机质增加 0.23 g/kg,土壤碳储量增加 1.30 t/hm²,与本研究得出的表层土壤养分不增反降相似。另外,由于本研究区处于鱼鳞坑修复初期,周瑶^[28]研究表明,土壤总磷等随鱼鳞坑修建时间的延长呈现出上升—下降—上升的趋势;同时,董艺博等^[29]研究表明可能因鱼鳞坑修建时间较短、研究区的干旱胁迫、根系吸收有机质等原因造成土壤养分含量下降,本研究结果与周瑶^[28]和董艺博等^[29]得出的鱼鳞坑修建初期土壤养分下降具有相似性。

3.2 比较阴坡、阳坡鱼鳞坑的水土保持效果

本文发现不同位置鱼鳞坑的水土保持效果存在差异。虽然阴坡、阳坡鱼鳞坑都能显著提高植被的根系深度($p < 0.05$),但阴坡鱼鳞坑还对土壤容重、TN 值、地上生物量具有显著性影响($p < 0.05$),与王明明等^[30]的研究结果具有相似性。研究^[30]表明,降水、蒸发条件可能导致不同位置鱼鳞坑的效果差异,在干旱缺水地区,阴坡鱼鳞坑对全氮、地上生物量的增加效果较阳坡显著,阴坡鱼鳞坑的水土保持效果更强,这一研究结果与本文结果具有相似性。究其原因,阴阳坡的效果差异可能由气候因素导致。裴宏伟等^[31]研究表明坝上地区气候较干旱,阴坡水分条件相对较好,植被生长茂盛,鱼鳞坑水土保持效果也更好。由土壤侵蚀模数计算结果可知,阴坡的平均土壤侵蚀模数高于阳坡,且坡度较大的山坡土壤侵蚀相对严重。周琼等^[32]研究发现土壤侵蚀程度影响水土保持工程的修复效果,这与本研究结果具有相似性。因此,在河谷与较陡的阴坡修建鱼鳞坑的水土保持效果更佳。

3.3 河谷鱼鳞坑构建对水土保持的影响的独特性

本文发现河谷地区的鱼鳞坑能显著增加土壤氨氮和硝态氮($p < 0.05$)。王文涛^[33]研究发现河谷鱼鳞坑能减少氨氮、硝态氮等土壤养分的径流流失,这与本文结果具有相似性。究其原因,刘鸿涛^[34]研究表明,与阴坡、阳坡等坡地相比,河谷地区侵蚀严重,特别是水流侵蚀,其径流量高于坡地地区,从而造成土壤碳氮流失严重,这与本文结果相印证。因此,河谷鱼鳞坑提高土壤氨氮和硝态氮的能力更加显著,修

建鱼鳞坑在较短时间内就缓解其氨氮、硝态氮的流失。

3.4 鱼鳞坑修建时间及其位置对鱼鳞坑水土保持效应的影响

本文得出鱼鳞坑的修建时间和位置对水土保持效果的影响较大。随着鱼鳞坑修建时间的增长,生物量、全氮、根系深度增加,土壤氧化还原电位降低,水土保持效果增强,这与周瑶^[28]的研究结果一致。对于氧化还原电位降低的原因,黎雅楠等^[35]研究表明,土壤氧化还原电位的影响因素包括土壤透气性、土壤水分、土壤有机质和植被状况等。根据已有研究,修建时间增长之所以导致氧化还原电位降低,可能是由于鱼鳞坑的修建使土壤水分增加,还原条件增强,利用碳源氮源的能力增强^[36]。本文还得出地上生物量、根系深度、全氮、DOC、氨氮、硝态氮等 6 种指标均从坡顶到坡底呈上升趋势,这与涂立辉等^[37]研究得出的修复措施的水土保持效果随坡位的上升而减小的规律具有相似性。

4 结论

(1) 鱼鳞坑能一定程度上保持水土,且不同位置(阴坡、阳坡、河谷)效果差异较大。

(2) 阴坡、阳坡鱼鳞坑均能显著提高根系深度($p < 0.05$),分别提高 104.19% 和 42.87%;阴坡鱼鳞坑对土壤容重、全氮、地上生物量的影响较阳坡显著($p < 0.05$);相比于阴坡阳坡,河谷鱼鳞坑能显著提高土壤氨氮和硝态氮($p < 0.05$),分别提高 125.16% 和 174.53%。

(3) 鱼鳞坑位置和修建时间对水土保持效果影响较大,坡位的影响较小。河谷鱼鳞坑的土壤容重、DOC 值、氨氮、硝态氮大于阴坡阳坡;随着鱼鳞坑修建时间的增长,生物量、TN 值、根系深度增加,土壤氧化还原电位降低,水土保持效果增强。

(4) 在土壤侵蚀较严重的阴坡、河谷,鱼鳞坑水土保持效果较强。应因地制宜地在侵蚀严重区推行鱼鳞坑,以促进水土保持。

本文研究坝上地区鱼鳞坑对水土保持的影响,具有一定的针对性;可为其他地区鱼鳞坑研究提供参考,以建立统一的鱼鳞坑生态修复方法,为生态修复措施选址与效果评估提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] 袁金国,王卫,龙丽民.河北坝上生态脆弱区的土地退化及生态重建[J].干旱区资源与环境,2006,20(2): 139-143.
- [2] 孙建中,盛学斌,刘云霞.河北坝上地区人类活动与生态

- 环境变化研究[J].环境科学进展,1999,7(4):102-111.
- [3] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价[J].水土保持通报,2020,40(4):303-311,345.
- [4] 郑江坤,吴黎军,魏天兴,等.陕北不同地貌部位土壤抗冲性特征研究[J].水土保持学报,2009,23(6):14-18,98.
- [5] 杨润泽,冯天骄,肖辉杰,等.京郊强降雨条件下不同水土保持治理措施配置模式效益评价[J].水土保持学报,2022,36(1):8-17.
- [6] 杜轶,郭青霞,郭汉清,等.汾河上游不同土地利用方式对坡地水土流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):44-51.
- [7] 王月玲,蔡进军,张源润,等.半干旱退化山区不同生态恢复与重建措施下土壤理化性质的特征分析[J].水土保持研究,2007,14(1):11-14.
- [8] 李萍,朱清科,王晶,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同规格鱼鳞坑集水效果研究[J].灌溉排水学报,2011,30(5):91-94.
- [9] 赵名彦,李芳然,李如意,等.坝上地区生产建设项目水土流失因素分析[J].中国水土保持,2021(8):21-23.
- [10] 刘庆德.河北张家口坝上草原草场退化的原因及防治对策[J].安徽农业科学,2010,38(15):8037-8038.
- [11] 周颖,张泽文,温烁,等.塞罕坝华北落叶松针叶光响应指标变化规律及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(5):1690-1698.
- [12] 李朝英,郑路.利用环刀法测定土壤水分精度的影响因素[J].水土保持通报,2019,39(2):118-123.
- [13] 余飞燕,王坤悦,叶鑫,等.金马河温江段河岸带不同生境草本群落物种多样性和生物量变化研究[J].草地学报,2020,28(3):793-800.
- [14] 郝建锋,余飞燕,姚小兰,等.放猪干扰对四川夹金山植物群落特征和生物量的影响[J].生态学报,2021,41(24):9645-9654.
- [15] 彭守璋.中国1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2020)[M].北京:国家青藏高原科学数据中心,2020.
- [16] 李苗苗.植被覆盖度的遥感估算方法研究[D].北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.
- [17] 王丽梅,张谦,白利华,等.人工樟子松林对毛乌素沙地土壤颗粒组成和固碳效果的长期影响[J].水土保持通报,2019,39(4):89-96.
- [18] 李金峰,刘林,薛丽萍,等.黄土丘陵沟壑区欧李人工林对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):21-26.
- [19] 李茂萍,缪宁,刘世荣.固氮树种旱冬瓜对退化林地土壤修复和林下植被重建的生态驱动效应[J].生态学报,2022,42(6):2321-2330.
- [20] 刘鹤龄,饶良懿,图尔荪,等.北方土石山区水蚀及水土保持措施对土壤有机碳的影响[J].浙江农林大学学报,2019,36(4):646-655.
- [21] 陈晓光,于寒青,刘文祥,等.基于 MDC 方法评价林下劣地碳氮提升对短期恢复措施的响应[J].水土保持学报,2020,34(4):280-287.
- [22] 宿婷婷,马红彬,周瑶,等.黄土丘陵典型草原土壤理化性质对生态恢复措施的响应[J].草业学报,2019,28(4):34-46.
- [23] 刘鸿涛.薄层覆土砒砂岩区土壤水分养分特征及新型调控技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [24] 窦玉青.鱼鳞坑的水力性质及设计指标[J].水土保持通报,2014(4):53-58.
- [25] 周连兄,李丹雄,杨之恒,等.山区景观生态项目建设中的水土保持问题[J].水土保持通报,2019,39(5):231-235,344-345.
- [26] 王月玲,王思成,蔡进军,等.半干旱黄土丘陵区不同整地方式下退化草地植物群落恢复特征[J].水土保持通报,2016,36(5):80-84.
- [27] 董一桥.人为践踏对南京紫金山林下植被根系及土壤渗透性影响[D].江苏 南京:南京林业大学,2021.
- [28] 周瑶.不同恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原土壤性状及其质量评价[D].宁夏 银川:宁夏大学,2018.
- [29] 董艺博.干旱胁迫对构树幼苗根际环境及根系有机酸组成影响研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2020.
- [30] 王明明,谢永生,王恒俊.潮滦河小流域鱼鳞坑内外植被群落特征与环境关系[J].水土保持通报,2007,27(6):80-84.
- [31] 裴宏伟,刘孟竹,李雅丽,等.生态修复措施对干旱半干旱地区生态系统服务影响研究:以河北坝上地区为例[J].水土保持研究,2022,29(2):192-199,205.
- [32] 周琼.三江源区山坡退化草地生态恢复技术应用效果及区域适应性评价[D].甘肃 兰州:兰州大学,2020.
- [33] 王文涛.石匣小流域不同水保措施坡面小区产流产沙及污染物输出特征分析[D].北京:北京林业大学,2020.
- [34] 刘鸿涛.薄层覆土砒砂岩区土壤水分养分特征及新型调控技术研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [35] 黎雅楠,熊宇斐.土壤氧化还原电位的研究及应用[J].农技服务,2019,36(9):49-50,52.
- [36] 贾希洋,马红彬,周瑶,等.不同生态恢复措施对宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落特征的影响[J].中国草地学报,2019,41(1):51-60.
- [37] 涂立辉.六盘山叠叠沟小流域4种典型植物群落的多功能评价[D].北京:中国林业科学研究院,2020.