

白草塬植被恢复后沟头草本植物 多样性与土壤因子的关系

陈卓鑫^{1,2,5}, 郭明明³, 王文龙^{1,2}, 冯兰茜^{1,2,5}, 娄义宝⁴, 朱亚男⁴, 杨浩⁴

(1.中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 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.中国科学院 东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态院重点实验室,
黑龙江 哈尔滨 150081; 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 探究黄土塬沟头在植被恢复后的草本植物多样性变化与土壤因子间的关系, 为该区沟头水土保持效益评估提供科学依据。[方法] 以农地沟头为对照, 选择不同植被恢复年限(5, 13, 18, 22 a)的白草塬草地沟头, 调查和测定了各植被恢复年限沟头的草本植物多样性和表层土壤(0—10 cm 和 10—25 cm)的土壤性质因子。[结果] 随植被恢复年限的增长, Patrick 丰富度指数呈现先增大后稳定的变化趋势; Shannon-Wiener 指数呈现持续上升的趋势, 植被恢复 18 a 和 22 a 时的 Shannon-Wiener 指数高于恢复 13 a, 但没有显著性差异; Pielou 均匀度指数呈现增加—降低—再增加的波动趋势, 且在恢复 22 a 时达到最大值(0.89)。白草塬沟头 0—10 cm 和 10—25 cm 的土壤容重均在恢复 22 a 时达到最小值, 较农地分别显著降低 13.1% 和 17.8% ($p < 0.05$); 0—10 cm 和 10—25 cm 的土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径和饱和导水率均随植被恢复年限的增加而显著增加, 两土层的土壤因子在各植被恢复年限上呈现出显著性差异。相关性分析显示草本植物多样性指标与容重间呈负相关关系, 与土壤有机质、水稳性团聚体、团聚体平均重量直径以及饱和导水率呈显著正相关 ($p < 0.05$)。冗余分析表明土壤团聚体含量与草本植物多样性变化密切相关。[结论] 植被恢复显著提高了沟头草本植物多样性, 可改善表层土壤性质, 在稳固沟头过程发挥重要作用。

关键词: 沟头; 多样性; 土壤性质; 植被恢复; 白草塬; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0053-08

中图分类号: S153.16

文献参数: 陈卓鑫, 郭明明, 王文龙, 等. 白草塬植被恢复后沟头草本植物多样性与土壤因子的关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 53-60, 76. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.007; Chen Zhuoxin, Guo Mingming, Wang Wenlong, et al. Relationship between herbaceous plant diversity and soil factors at a gully head after revegetation in Baicao Tableland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 53-60, 76.

Relationship Between Herbaceous Plant Diversity and Soil Factors at a Gully Head After Revegetation in Baicao Tableland

Chen Zhuoxin^{1,2,5}, Guo Mingming³, Wang Wenlong^{1,2},

Feng Lanqian^{1,2,5}, Lou Yibao⁴, Zhu Yanan⁴, Yang Hao⁴

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological

Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of

Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences,

Harbin, Heilongjiang 150081, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The changes in herbaceous plant diversity and the factors influencing those changes

收稿日期: 2022-11-03

修回日期: 2022-12-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“植被对沟头溯源侵蚀过程中水力—重力作用的影响机制”(42077079)

第一作者: 陈卓鑫(1994—), 男(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: xiyu.zxchen@foxmail.com.

通讯作者: 王文龙(1964—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究。Email: wlwang@nwsuaf.edu.cn.

after revegetation at a gully head were studied in order to provide a relevant foundation for the assessment of the benefits of soil and water conservation in the loess tableland. [Methods] Herbaceous plant diversity at a gully head was measured and soil property indexes related to the topsoil (0—10 cm and 10—25 cm) were determined by selecting grassland gully heads with vegetation restoration periods of 5, 13, 18, and 22 years in the Baicao Tableland. Farmland was used as the control. [Results] The Patrick richness index initially increased with increasing number of vegetation restoration years, and then stabilized. The Shannon-Wiener index showed a continuously increasing trend, and the Shannon-Wiener index values in 18 and 22 years of vegetation restoration were greater than at 13 years of restoration. However, the differences were not significantly different. The Pielou evenness index exhibited a fluctuating trend of increasing, and then decreasing, then increasing again, reaching a maximum value (0.89) in 22 years of recovery. The soil bulk density in both the 0—10 cm and 10—25 cm layers reached a minimum value in 22 years of recovery, with significant decreases of 13.1% and 17.8%, respectively, compared with values observed for farmland ($p < 0.05$). The soil organic matter content, water-stable aggregate content, mean weight diameter of aggregates, and saturated hydraulic conductivity in the 0—10 cm and 10—25 cm layers significantly increased with increasing number of vegetation restoration years, and soil factors between the two soil layers demonstrated significant differences at each restoration year. Correlation analysis indicated a negative correlation between herbaceous plant diversity indicators and soil bulk density, and a significant positive correlation ($p < 0.05$) with soil organic matter content, water-stable aggregate content, mean weight diameter of aggregates, and saturated hydraulic conductivity. Redundancy analysis revealed that soil aggregate content was an important factor in explaining herbaceous plant diversity variation. [Conclusion] Vegetation restoration could significantly increase herbaceous plant diversity, and could play an important role in improving soil properties at a gully head in the loess tableland.

Keywords: gully head; herbaceous plant diversity; soil property; vegetation restoration; Baicao Tableland; Loess Plateau

黄土高原是世界上水土流失和生态环境问题最严重的区域之一,在黄土塬区,塬面、坡面和沟道是主要的地貌类型^[1]。黄土塬地势平坦且易于耕作,是中国西北黄土地区主要的农业耕作区域,由于强烈的沟头溯源侵蚀致使塬面面积快速减少,多处塬面近乎消失^[2-3]。为了遏制沟头前进,政府开展了一系列退耕还林(草)等植被恢复措施^[4]。农地退耕后,土地利用发生了显著变化,植被覆盖度显著提高,植被群落结构和土壤性质等也相应的发生了巨大变化^[5]。因此,在长期的植被恢复后,沟头的草本植物多样性和土壤特性变化亟待进一步评估。

植被恢复有效地改善了植被生长条件,农地退耕通常会提高植被多样性和生产力^[6]。Xu Hongwei 等^[7]研究表明,黄土高原不同植被带的农地在退耕后的植被多样性均呈现先升高而后趋于稳定的趋势。相反,对于林下的草本植物多样性而言,刘俊廷等^[8]研究表明,草本的物种多样性指数、丰富度指数以及均匀度指数均随着退耕年限的增加而有所减小,说明在长期的植被恢复时,林下草本植物多样性与植被种类间的竞争有关,乔木的存在可能会限制草本植物的

生长。同时,植被恢复也显著改善了土壤性质^[9-11]。王文鑫等^[12]对董志塬植被恢复后沟头土壤团聚体的变化的研究发现,土壤团聚体含量与植被恢复年限呈线性递增关系,植被恢复有效地提高了沟头土壤抗蚀性。另外,植被恢复 7~25 a 时,土壤容重相对于农地显著降低^[9],饱和导水率也随之提高,其入渗能力与容重和孔隙度密切相关^[13]。植被和土壤之间的协同作用是长期的,土壤为植被生长提供水分和养分,而植被通过供给有机物质来循环土壤中的养分并提高土壤质量^[13-15]。有研究^[8,16]表明,植物群落多样性指标与有机碳含量、pH 值、氨氮、全磷呈正相关关系。然而,目前的研究多集中在黄土丘陵区,而在黄土塬区研究较少,特别是鲜有研究聚焦于沟头在农田弃耕后的草本植物多样性变化。因此,本研究以白草塬沟头为研究对象,以农地沟头为对照,调查了植被恢复年限为 5,13,18,22 a 的草地沟头草本植物多样性,并分别测定了 0—10 cm 和 10—25 cm 土层的土壤容重、有机质、饱和导水率等相关土壤因子。旨在分析不同植被恢复年限沟头的草本植物多样性以及土壤特征变化,以期为黄土塬区植被恢复后的生态效益评估提供相关依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的研究区白草塬位于甘肃省会宁县(36°11′—36°13′N, 105°04′—105°06′E), 该塬海拔高度为1 600~1 700 m。白草塬地处温带季风气候区西北边缘, 气候干燥少雨, 多年平均降水量仅为270 mm, 且降雨多集中在7—9月, 多年平均气温为8℃, 一年中在7月最高。土壤类型主要以沙壤土和黄绵土为主^[17]。由于植被恢复前长期开垦, 区内天然植被存留较少。植被恢复后, 沟头大量农地转换为草地, 植被状况得到改善^[18], 塬内以多年生的草本为主。

1.2 样点选择和取样方法

2019年7月对白草塬沟头的植被情况展开了大量的实地调查, 发现塬内沟头的土地利用类型多以自然恢复的草地为主, 仅存少量沟头继续在耕作, 通过多次询问当地农户, 解译多期遥感影像, 并结合植被自然演替规律确定了白草塬沟头的植被恢复年限。基于调查结果, 在选择样地时, 采用“时间替代空间”的方法^[7, 12], 在2019年8月进行了草本植物和土壤取样。本研究以农地沟头(恢复0 a)作为对照, 在白

草塬选取了植被恢复年限分别为5, 13, 18, 22 a的草地样点, 以反映白草塬沟头在植被恢复后的草本植物变化和土壤特征。为了最大限度地减少选点对结果的潜在影响, 这些样点都具有相同土壤类型, 坡度和坡向也具有相似性, 坡度为采样点所在处的坡度, 坡向为沟头(沟道)朝向。取样点的基本信息如表1所示。一般而言, 黄土塬植被恢复靠近沟沿线以遏制沟头溯源。为了确保取样人员的安全, 取样点距离沟沿线0.5 m左右^[10, 12]。在每个取样点布设3个1 m×1 m的样方进行草本植物调查, 要求3个样方内草本植物长势大体一致。①确定样方后首先记录每个样方内草本植物名称、高度、多度等, 而后垂直于地面拍摄照片。②刈割样方内所有的草本植物, 带回室内后放入烘箱中进行烘干, 称取各草本植物物种生物量, 计算总生物量。通过计算样方内各物种重要值确定各个样地的优势种。③去除样方内残存的枯枝落叶物, 按表层0—10, 10—25 cm 2个土层, 分别用环刀(体积为100 cm³)测定土壤容重和饱和导水率(双环刀定水头法)。使用自封袋收集大约1 kg的土样, 风干后用于室内测定有机质含量、土壤颗粒组成、土壤团聚体含量等指标, 测定方法参考相关文献^[10, 12]。

表1 白草塬沟头的取样点基本信息

Table 1 Description information of sampling site at gully head in Baicao Tableland

植被恢复年限/a	样点	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	坡度/(°)	坡向	优势种
0	1	104.978	36.208	1805	3	阳坡	玉米
0	2	104.994	36.223	1 825	2	阳坡	玉米
0	3	105.019	36.229	1 852	2	阳坡	玉米
5	1	104.947	36.198	1 805	2	半阳坡	骆驼蓬
5	2	105.029	36.186	1 821	4	半阳坡	骆驼蓬
5	3	105.042	36.199	1 854	2	阳坡	骆驼蓬
13	1	105.045	36.227	1 903	4	半阳坡	冰草+黄花蒿
13	2	105.049	36.201	1 863	1	阳坡	冰草+黄花蒿
13	3	105.040	36.187	1 829	2	阳坡	冰草+黄花蒿
18	1	105.009	36.179	1 809	3	半阳坡	冰草
18	2	105.028	36.230	1 867	4	半阳坡	冰草
18	3	104.962	36.215	1 816	5	阳坡	冰草
22	1	104.966	36.173	1 775	4	半阳坡	赖草
22	2	105.061	36.229	1 932	2	阳坡	赖草
22	3	105.074	36.210	1 873	3	半阳坡	赖草

1.3 指标计算方法

以Patrick丰富度指数(R)、Shannon-Weiner多样性指数(H)和Pielou均匀度指数(E)为指标, 研究不同植被恢复年限的草本植物多样性变化, 其计算方法分别如公式(1)—(3)所示:

$$R = S \quad (1)$$

$$H = -\sum P_i \cdot \ln P_i \quad (2)$$

$$E = H / \ln S \quad (3)$$

式中: S 为物种总数; P_i 为*i*种的相对重要值, $P_i = (\text{相对生物量} + \text{相对多度} + \text{相对高度}) / 3$ 。

土壤容重(SBD, soil bulk density)、饱和导水率(SHC, saturated hydraulic conductivity)、水稳性团聚体含量(WSA, water-stable aggregate content)和团聚体平均重量直径(MWD, mean weight diameter

of aggregates) 的相关指标计算方法为:

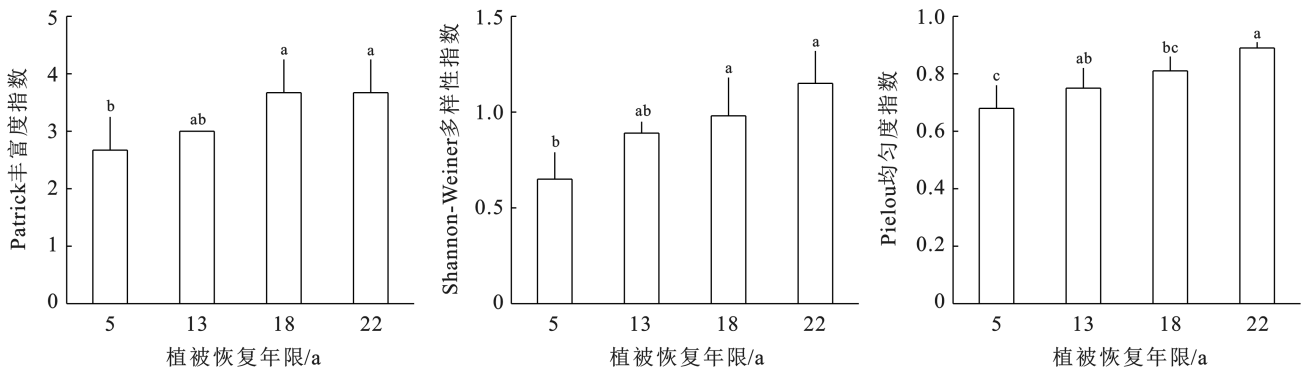
$$\text{SBD} = \frac{m_1 - m_0}{V} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{SHC} = \frac{QL}{At \cdot \Delta h} \quad (5)$$

$$\text{WSA} = \frac{M_{d>0.25}}{M_D} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (7)$$

式中: m_1 为土壤烘干后重量(g); m_0 为环刀重(g); V 为环刀体积(100 cm^3); SHC 为饱和导水率, 采用定水头法测定(mm/min); Q 为渗透水的体积(ml); L 为土芯长度(mm); A 为土芯截面积(cm^2); t 为渗透时间(min); Δh 为水头差(mm); $M_{d>0.25}$ 为 $>0.25 \text{ mm}$ 的团聚体质量(g); M_D 为总团聚体质量(g); X_i 为团聚体各粒径的平均直径(mm); W_i 为团聚体各粒径的百分含量(%)。



注:不同小写字母表示不同恢复年限的指标差异显著。

图 1 沟头草本植物多样性随植被恢复年限的变化

Fig.1 Variation of herbaceous plant diversity of gully head with restoration years

2.2 土壤因子随植被恢复年限的变化

图 2 表征了白草塬沟头土壤因子随植被恢复年限的变化。由图 2 可以看出: ①随着恢复群落的演替(0—22 a), 白草塬沟头 0—10 cm 的土壤容重呈现先短暂增大后减小的趋势, 恢复 5 a 较农地增加了 5.7%, 恢复 22 a 时较农地显著减小 13.1% ($p < 0.05$); 白草塬沟头 10—25 cm 的土壤容重呈现减小的趋势, 在恢复 22 a 为 $1.11 \text{ g}/\text{cm}^3$, 较农地降低 17.8%, 整体上 10—25 cm 的容重高于 0—10 cm, 但没有显著性差异。②两土层土壤有机质随植被恢复年限的增大均呈现出增加的趋势, 0—10 cm 土层的各植被恢复年限间均呈现显著性差异, 10—25 cm 恢复 22 a 后显著高于 13 a 和 18 a。在恢复 13 a 以后, 10—25 cm 的有机质显著低于 0—10 cm 土层 ($p < 0.05$)。③对于

2 结果与分析

2.1 草本植物多样性随植被恢复年限的变化

草本植物多样性指标随植被恢复年限的变化如图 1 所示。随着植被恢复年限的增加白草塬沟头草本植物多样性指标均呈上升趋势, 但变化的规律呈现一定的差异。

Patrick 丰富度指数呈现出先增大后稳定的变化趋势, 恢复 13 a 较恢复 5 a 差异不显著 ($p > 0.05$), 恢复 18 a 和 22 年时显著高于恢复 5 a ($p < 0.05$), 分别高 37.4% 和 37.4%。Shannon-Wiener 指数呈现持续上升的趋势, 恢复 18 a 和 22 a 时显著高于恢复 5 a ($p < 0.05$), 但和恢复 13 a 没有显著性差异。Pielou 均匀度指数呈现增加—降低—再增加的波动趋势, 在植被恢复年限为 18 a 时短暂降低, 但在恢复 22 a 时达到最大值(0.89), 且显著高于 18 a, 但与 13 a 时没有显著性差异。

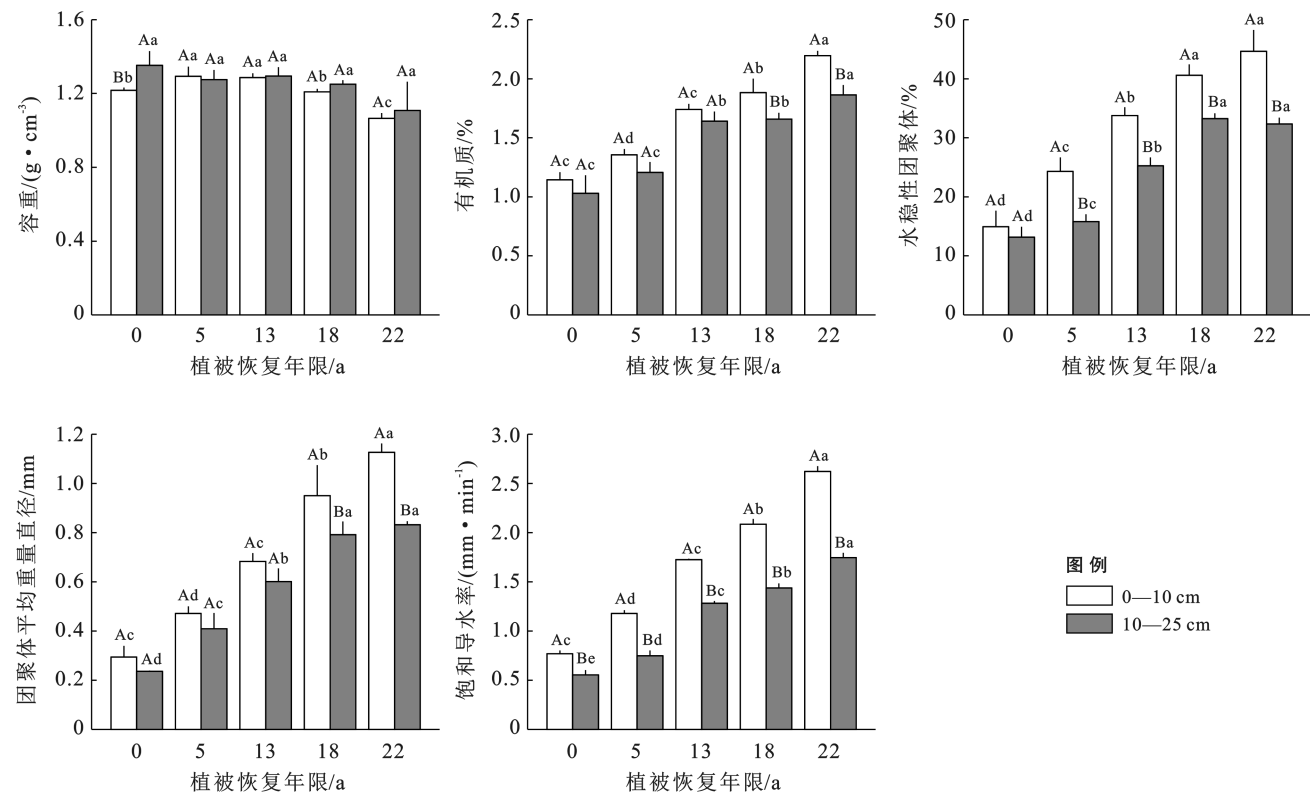
团聚体变化, 水稳性团聚体含量和团聚体平均重量直径随植被恢复年限呈现了相似的变化趋势, 随植被恢复的进行, 土壤团聚体呈上升趋势, 且在恢复 18 a 后, 0—10 cm 的团聚体显著高于土层 10—25 cm。④土壤饱和导水率随植被恢复显著提高, 且两土层间具有显著差异, 在恢复 22 a 时, 0—10 cm 和 10—25 cm 土层的饱和导水率是农地的 3.4 和 3.1 倍。

2.3 草本植物多样性与土壤因子的相关性

表 2—3 表征了沟头草本植物多样性指标与土壤特性指标的相关性。由表 2—3 可知, 对于 0—10 cm 土层, Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数与容重间呈负相关关系, 但不显著 ($p > 0.05$), 而 Patrick 丰富度指数与容重并不显著, 相反, 在 10—25 cm 土层, 草本植物多样性与容重无显著性负相关

关系。此外,除 10—25 cm 土层的 Patrick 丰富度指数与有机质和 Pielou 均匀度指数与水稳性团聚体间存在正相关关系,但不显著($p < 0.05$),其余的草本植物多样性指标均与另外的土壤因子均具有显著的正相关关系($p < 0.05$)。同时,草本植物多样性指标与土壤因子的相关性强弱在不同土层存在差异,对于团

聚体平均重量直径,草本植物多样性指标与 10—25 cm 土层土壤因子的关系强于 0—10 cm 土层,而对于土壤有机质、水稳性团聚体含量和饱和导水率则相反。另外,表 4 表明,在不同的土层,草本植物丰富度指标与土壤因子的拟合方程呈现差异,但以二次函数方程为主。



注:大写字母表示相同植被恢复年限下各指标在不同土层的显著性差异,小写字母表示同一指标和同一土层在不同植被恢复年限下的显著性差异。

图 2 沟头表层土壤性质随植被恢复年限的变化

Fig.2 Changes in top soil properties of gully head with restoration years

表 2 沟头 0—10 cm 土层的草本植物多样性指标与土壤因子的相关性

Table 2 Correlation between herbaceous diversity indicators and soil factors in 0—10 cm soil layer of gully head

指标	容重	有机质	水稳性团聚体	团聚体平均重量直径	饱和导水率
Patrick 丰富度指数	-0.52	0.73**	0.60*	0.66*	0.69*
Shannon-Wiener 指数	-0.69*	0.85***	0.73**	0.74**	0.83**
Pielou 均匀度指数	-0.68*	0.71**	0.68*	0.62*	0.71*

注:***表示指标之间在 0.001 水平上显著相关;**表示指标之间在 0.01 水平上显著相关;*表示指标之间在 0.05 水平上显著相关。下同。

表 3 沟头 10—25 cm 土层的草本植物多样性指标与土壤因子的相关性

Table 3 Correlation between herbaceous diversity indicators and soil factors in 10—25 cm soil layer of gully head

指标	容重	有机质	水稳性团聚体	团聚体平均重量直径	饱和导水率
Patrick 丰富度指数	-0.46	0.58	0.67*	0.72**	0.63*
Shannon-Wiener 指数	-0.56	0.74**	0.72**	0.83**	0.78**
Pielou 均匀度指数	-0.48	0.67*	0.54	0.7*	0.7*

表 4 草本植物多样性指标与土壤因子的拟合方程

Table 4 Fitting equations of herbaceous plant diversity indicators with soil factors

土层/cm	拟合方程	p 值	R^2	指标
0—10	$y = -23.09 + 48.23x - 21.72x^2$	0.138	0.36	Patrick 丰富度指数—容重
	$y = \exp(1.95 - 1.37/x)$	0.005	0.56	Patrick 丰富度指数—有机质
	$y = 1.65 + 0.04x$	0.04	0.36	Patrick 丰富度指数—水稳性团聚体
	$y = 1.29 + 3.52x - 1.24x^2$	0.073	0.44	Patrick 丰富度指数—团聚体平均重量直径
	$y = 0.77 + 1.92x - 0.3x^2$	0.046	0.50	Patrick 丰富度指数—饱和导水率
	$y = -5.44 + 12.49x - 5.94x^2$	0.036	0.52	Shannon-Wiener 指数—容重
	$y = \exp(1.09 - 2.09/x)$	0.000	0.75	Shannon-Wiener 指数—有机质
	$y = 0.05x^{0.79}$	0.006	0.55	Shannon-Wiener 指数—水稳性团聚体
	$y = \exp(0.44 - 0.4/x)$	0.004	0.59	Shannon-Wiener 指数—团聚体平均重量直径
	$y = 0.11 + 0.52x - 0.05x^2$	0.006	0.69	Shannon-Wiener 指数—饱和导水率
	$y = 0.23 + 1.65x - 0.97x^2$	0.055	0.47	Pielou 均匀度指数—容重
	$y = 0.68 - 0.11x + 0.09x^2$	0.038	0.52	Pielou 均匀度指数—有机质
	$y = \exp(0.1 - 11.69/x)$	0.008	0.52	Pielou 均匀度指数—水稳性团聚体
	$y = \exp(-0.01 - 0.17/x)$	0.017	0.45	Pielou 均匀度指数—团聚体平均重量直径
$y = 0.63 + 0.04x + 0.02x^2$	0.041	0.51	Pielou 均匀度指数—饱和导水率	
10—25	$y = 1.36 + 6.7x - 4.16x^2$	0.319	0.22	Patrick 丰富度指数—容重
	$y = -6.36 + 11.45x - 3.32x^2$	0.077	0.44	Patrick 丰富度指数—有机质
	$y = 3.25 - 0.08x + 0x^2$	0.058	0.47	Patrick 丰富度指数—水稳性团聚体
	$y = 4.07 - 6.15x + 6.97x^2$	0.018	0.59	Patrick 丰富度指数—团聚体平均重量直径
	$y = 2.93x^{0.4}$	0.023	0.42	Patrick 丰富度指数—饱和导水率
	$y = 0.01 + 3.1x - 1.9x^2$	0.169	0.33	Shannon-Wiener 指数—容重
	$y = \exp(1.04 - 1.79/x)$	0.001	0.65	Shannon-Wiener 指数—有机质
	$y = 0.12(x^{0.61})$	0.007	0.53	Shannon-Wiener 指数—水稳性团聚体
	$y = 0.62 - 0.34x + 1.12x^2$	0.005	0.70	Shannon-Wiener 指数—团聚体平均重量直径
	$y = 0.77x^{0.64}$	0.002	0.63	Shannon-Wiener 指数—饱和导水率
	$y = 0.26 + 1.48x - 0.85x^2$	0.275	0.25	Pielou 均匀度指数—容重
	$y = 0.65 - 0.1x + 0.12x^2$	0.065	0.45	Pielou 均匀度指数—有机质
	$y = 0.07 + 0.05x + 0x^2$	0.089	0.42	Pielou 均匀度指数—水稳性团聚体
	$y = \exp(0.03 - 0.17/x)$	0.005	0.56	Pielou 均匀度指数—团聚体平均重量直径
$y = 0.69 - 0.07x + 0.1x^2$	0.039	0.51	Pielou 均匀度指数—饱和导水率	

2.4 土壤因子对草本植物多样性的冗余分析

在冗余分析的双排序图中,实线箭头表示土壤因子,虚线箭头表示草本植物多样性因子。箭头长度表征草本植物多样性指标与土壤因子变化的强弱关系,箭头连线与排序轴间的夹角表示该箭头表示的因子与该排序轴的相关性,夹角越小则相关性越高;不同箭头之间的夹角表示因素间的相关性,夹角小于 90° 则为正相关,夹角大于 90° 则相反。土壤因子对草本植物多样性的冗余分析表明(图 3),对于 0—10 cm 土层,在排序的第一轴和第二轴解释了方差的 80.6% (第一轴和第二轴分别为 80.36% 和 0.19%),土壤因子能很好地解释了草本植物多样性的变化,在第一轴上,水稳性团聚体、饱和导水率与草本植物多样性的关系最强且呈正相关关系(夹角小于 90° 且长度最长)。图 3 说明了水稳性团聚体与草本植物多样性变化密切相关。另外,在 10—25 cm 土层上,第一轴和

第二轴分别解释了方差的 62.48% 和 0.11%。团聚体平均重量直径和有机质在第一轴上解释最大,与草本植物多样性指标呈正相关关系,图 3 表明团聚体平均重量直径的相对重要性最大。

3 讨论

草本植物多样性或丰富度可以表示白草塬沟头在植被恢复后群落的基本特征,这对优化沟头生态系统结构和功能具有重要作用^[19]。沟头农地弃耕后,土地利用的变化显著提高了草本植物状况,这与之前的多项研究一致^[9,15,20-21]。本研究表明,Patrick 丰富度指数在植被恢复 18 a 前呈上升趋势但在 18 a 后趋于稳定,这说明随着植被恢复的进行,草本植物物种数可能存在阈值^[7],这可能与当地的降雨、气候以及土壤营养条件有关。Shannon-Wiener 指数随植被恢复年限增加呈增加趋势(图 1),草本植物群落变得更

为复杂。Deng 等^[21]在黄土高原的研究表明,植物多样性受表层土壤蓄水量差异的显著影响,尤其在干旱和半干旱地区的草地上,植被 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数受水分条件的胁迫,一定的降水量只能供应相应水平的植被生长^[22]。因此,在半干旱地区,随着植被恢复的进行,草本植物需水量的增多与降水量的平衡关系应引起重视。另外,Pielou 均匀度指数随植被恢复年限呈现增加—降低—再增加的波动上升趋势,在植被恢复 18 a 时出现了短暂的下降,这表明在农田弃耕的初期,此时的土壤条件仅能供应一年生或二年生草本植物生长,种间竞争度相对较小,草本植物的均匀度指数较低^[5]。然而,随

植被恢复年限的增大,群落内的优势种与伴生种优势度差异逐渐降低。在某一植被恢复年限,草本植物优势种发生更替,优势种与伴生种的优势度进行了交换,导致草本植物群落均匀度指数呈波动式上升^[7,23]。另外,从水土保持角度来看,植被影响沟头稳定的机制是多方面的。沟头作为沟道上方来水的重要通道,植被通过地上部分截留雨水和地下部分稳定松散土壤并改善入渗条件来改变沟头的水文过程,沟头良好的汇水条件会影响植被恢复进程,同时也会改变土壤侵蚀过程^[1,9,12]。同时,不同植被的搭配关系也会影响土壤侵蚀过程,相对于农地,植被恢复后沟头可有效减缓沟头溯源速率,保护该地区的宝贵土地资源^[11]。

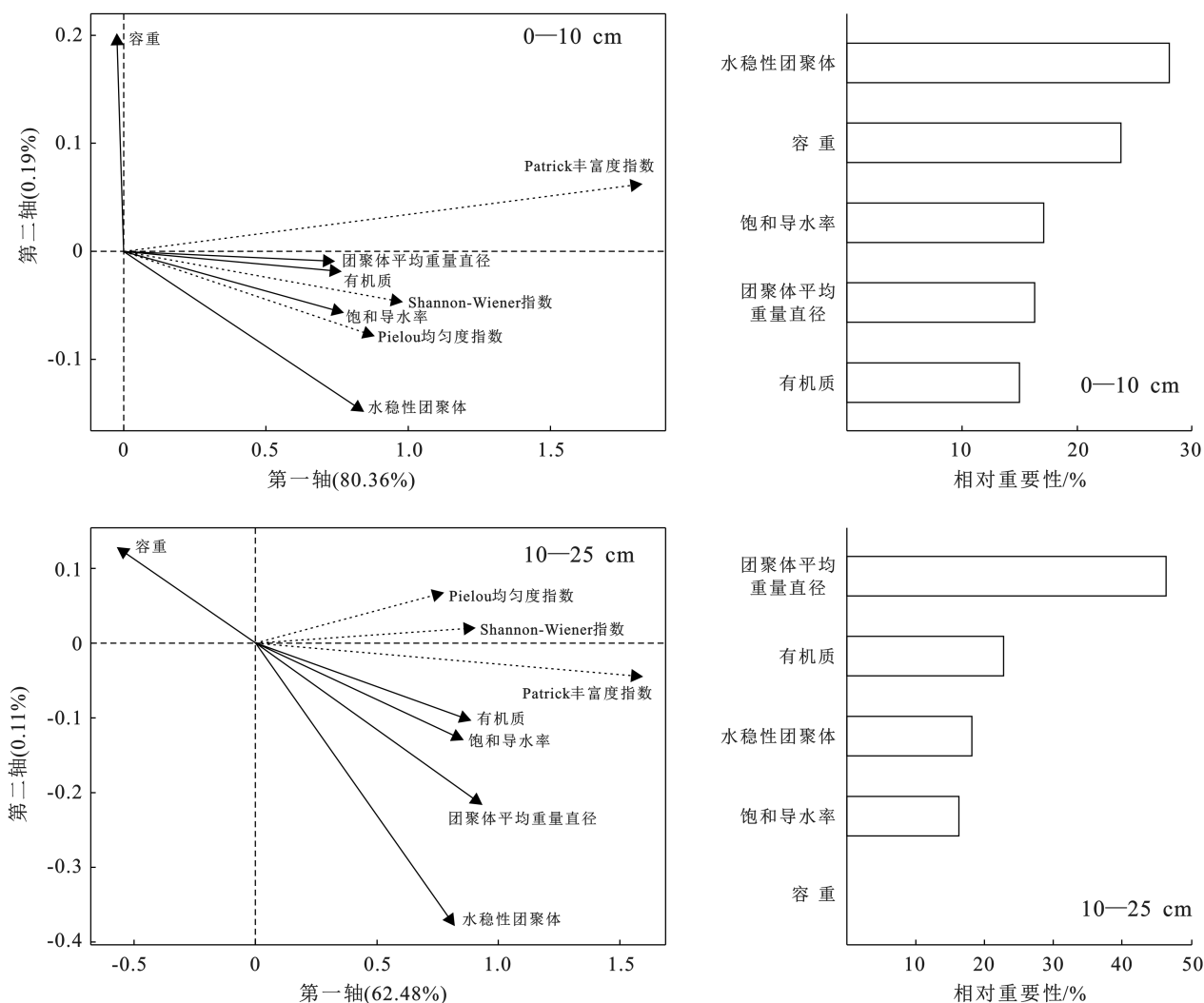


图 3 土壤因子对草本植物多样性的冗余分析

Fig.3 Redundancy analysis of soil factors on herbaceous diversity

沟蚀的活跃点位于沟头,沟头是沟壑形成的主要部位。植被作为沟头部位生态系统中的最关键部分之一,植物—土壤间的互馈效应显著影响沟头植被群落结构和土壤特性^[24-25]。本研究表

明,白草塬沟头的土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径和饱和导水率均随植被恢复年限的增加而显著增加,这与 Guo Mingming 等^[9]、王文鑫等^[12]对董志塬沟头的研究相吻合。另外,王凯博等^[23]在子午

岭的研究表明,在 0—20 cm 土层中,土壤有机质以及全氮与植被多样性指标呈正相关关系,而在 40—60 cm 土层上,植被多样性减弱了对该土层土壤理化性质影响。吕渡等^[26]也认为植被恢复对土壤因子的影响随土层深度的增加而逐渐减小,这说明植被恢复虽能改善土壤养分条件,但其改良作用具有表聚效应^[16]。归其原因,可能有以下 3 方面原因:①植物多样性的增加提高了植物生产力,减少了地表蒸腾作用,可利用的碳和氮源增加为土壤微生物提供充足的基质供应,枯落物的快速分解增加了表层土壤有机质含量,有机碳的积累显著改善了表层土壤的理化性质^[7,10,22]。②研究表明沟头在植被恢复后,土壤容重降低和饱和导水率的增加有效地提高了土壤物质和土壤水分的迁移效率,为改善土壤质量提供了有利的养分积累和循环的土壤环境,也减少了因土壤侵蚀造成的表层养分损失^[13]。③植被根系(尤其是草被)主要分布在表层土壤,根系分泌物粘附根际土壤颗粒表面,通过范德华力增强土壤稳定性,同时也是形成土壤大孔隙的重要途径,大孔隙的积累和持续性显著增加了土壤的入渗能力和土壤团聚体稳定性,根系在土壤结构改善中起到了重要作用^[26]。因此,随植被恢复的进行,沟头表层土壤条件的改善对稳固白草塬沟头具有重要作用。

4 结论

随植被恢复的进行,Patrick 丰富度指数在植被恢复 18 a 左右时趋于稳定,Shannon-Wiener 指数呈上升趋势,而 Pielou 均匀度指数呈波动上升趋势。与农地相比,植被恢复有效地改善了沟头表层土壤条件,土壤有机质、水稳性团聚体、团聚体平均重量直径和饱和导水率且均随植被恢复年限的增加而增加,但 0—10 cm 的相关土壤因子显著高于 10—25 cm 土层。草本植物多样性指标与容重间具有负相关关系,与有机质、水稳性团聚体、团聚体平均重量直径以及饱和导水率之间呈显著正相关关系($p < 0.05$),冗余分析表明土壤团聚体含量与草本植物多样性变化密切相关。

[参 考 文 献]

- [1] 陈卓鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响[J].自然资源学报,2020,35(2):387-398.
- [2] Liu Kai, Na Jiaming, Fan Chenyu, et al. Large-scale detection of the tableland areas and erosion-vulnerable hotspots on the Chinese Loess Plateau [J]. Remote Sensing, 2022,14(8):1946.
- [3] 金钊.黄土塬:千沟万壑之中的平坦之地[J].地球环境学报,2020,11(1):119-124.
- [4] 姚文艺,刘国彬.新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J].水土保持通报,2020,40(5):333-340.
- [5] 王文鑫.不同植被带黄土塬沟头植被恢复对土壤性质和可蚀性的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [6] Guo Yanqing, Xu Tengqi, Cheng Jimin, et al. Above- and belowground biodiversity drives soil multifunctionality along a long-term grassland restoration chronosequence [J]. Science of The Total Environment, 2021, 772:145010.
- [7] Xu Hongwei, Qu Qing, Chen Yanhua, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021,196:104812.
- [8] 刘俊廷,张建军,王恒星,等.晋西黄土区不同退耕年限油松林草本多样性与土壤养分的关系[J].干旱区研究,2020,37(2):400-409.
- [9] Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Changes in soil properties and resistance to concentrated flow across a 25-year passive restoration chronosequence of grasslands on the Chinese Loess Plateau [J]. Restoration Ecology, 2020,28(1):104-114.
- [10] Guo Mingming, Chen Zhuoxin, Wang Wenlong, et al. Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau [J]. The Science of the Total Environment, 2021,772:145540.
- [11] Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2018, 10 (5):712-725.
- [12] 王文鑫,王文龙,郭明明,等.黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响[J].中国农业科学,2019,52(16):2845-2857.
- [13] Qiu Dexun, Xu Ruirui, Wu Changxue, et al. Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2022,609:127730.
- [14] Cao Shengpeng, Zhang Lifeng, He Yi, et al. Effects and contributions of meteorological drought on agricultural drought under different climatic zones and vegetation types in Northwest China [J]. Science of The Total Environment, 2022,821:153270.
- [15] Dong Lingbo, Li Jiwei, Zhang Yu, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau [J]. Journal of Environmental Management, 2022,302:113985.

- 腐殖质组分的光谱学特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(2): 523-528.
- [24] Moe S R, Wegge P. Effects of deposition of deer dung on nutrient redistribution and on soil and plant nutrients on intensively grazed grasslands in Lowland Nepal [J]. *Ecological Research*, 2007, 23(1): 227-234.
- [25] 逯军峰, 董治宝, 胡光印, 等. 甘肃省玛曲县土地沙漠化发展及其成因分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 604-609.
- [26] 袁宏波, 王辉, 李晓兵, 等. 玛曲县天然草地沙化动态及现状分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2006, 41(1): 73-78.
- [27] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1079-1086.
- [28] 张余, 张克存, 孟宪红, 等. 高寒草地沙化过程的气候因子分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(1): 187-195.
- [29] 柴成武, 徐先英, 张莉, 等. 玛曲县气候特征分析[J]. *草原与草坪*, 2012, 32(2): 74-77.
- [30] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 2000.
- [31] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 近 10 年青海湖东沙地人工植被群落特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2109-2121.
- [32] Magurran A E. *Ecological Diversity and Its Measurement* [M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 1988.
- [33] 田福平, 陈子萱, 石磊. 施肥对玛曲高寒沙化草地地上生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 35-38.
- [34] 郑华平, 陈子萱, 王生荣, 等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. *草业通报*, 2007, 16(5): 34-39.
- [34] 燕金锐, 律其鑫, 高增平, 等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(9): 303-307.
- [35] 陈春良, 鲍凯强, 王梦莹, 等. 植被去除对侵蚀环境土壤有机质和养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 131-136.
- [36] 丁越岩, 杨劫, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(2): 18-25.
- [37] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 153-163.
- [38] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 86-92.

(上接第 60 页)

- [16] 廖娇娇, 窦艳星, 安韶山. 黄土高原不同植被群落多样性与土壤有机碳密度关系研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 75-82.
- [17] 林国伟, 李志, 李晨曦, 等. 黄土高原白草原土壤水分特征及对土地利用变化的响应[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 32-38.
- [18] 黄亚楠, 林国伟, 李志. 黄土高原白草原土地利用变化对地下水补给的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 250-255.
- [19] Hu Ya, Li Xiangyun, Guo Aixia, et al. Species diversity is a strong predictor of ecosystem multifunctionality under altered precipitation in desert steppes [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108762.
- [20] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2014, 116: 51-59.
- [21] Deng Lei, Wang Kaibo, Li Jianping, et al. Effect of soil moisture and atmospheric humidity on both plant productivity and diversity of native grasslands across the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 525-531.
- [22] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, et al. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 185(1/4): 221-240.
- [23] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [24] Yang Yang, Cheng Huan, Dou Yanxing, et al. Plant and soil traits driving soil fungal community due to tree plantation on the Loess Plateau [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 708: 134560.
- [25] Yang Yang, Liu Bingru, An Shaoshan. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China [J]. *Catena*, 2018, 166: 328-338.
- [26] 吕渡. 不同恢复类型植被细根分布特征及其与土壤理化性质耦合关系[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.