

# 沙化对高寒草甸土壤磷素组分的影响

李冬梅<sup>1,2</sup>, 尹霞<sup>1</sup>, 李良安<sup>1,2</sup>, 刘淑英<sup>1</sup>, 高永恒<sup>2</sup>, 王平<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2.中国科学院 成都生物研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** [目的] 土壤磷素组分决定着土壤演变过程中磷素的迁移和可用性。探讨高寒草甸不同退化程度下土壤磷素组分的空间分布特征, 为沙化草甸植被恢复提供科学参考。[方法] 以青藏高原若尔盖沙化高寒草甸土壤为研究对象, 采用修正后的 Hedley 磷素分级方法, 探究未沙化、轻度、中度和重度沙化程度下高寒草甸土壤磷组分变化。[结果] ①随着沙化程度的加剧, 土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷及含水量显著降低 ( $p < 0.05$ ); pH 值显著升高 ( $p < 0.05$ )。②土壤树脂态磷 (Resin-Pi)、碳酸氢钠磷 ( $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ )、氢氧化钠磷 ( $\text{NaOH-P}$ )、稀盐酸无机磷 (D.HCl-Pi) 和浓盐酸磷 (C.HCl-P) 含量随沙化程度的加剧均出现显著 ( $p < 0.05$ ) 下降, 其中在中度和重度沙化下有机磷组分含量较无机磷下降更为明显。③相关性分析显示, 在高寒草甸沙化过程中土壤磷素组分的转化主要发生在 D.HCl-Pi、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$  与氢氧化钠有机磷 ( $\text{NaOH-Po}$ ) 组分之间; 而 HCl-P、 $\text{NaOH-P}$  和 Resin-Pi 是植物生长重要的磷源。[结论] 沙化对土壤碳氮、水分、pH 值和磷素组分有显著影响, 沙化导致土壤碳氮、水分及 pH 值和磷素组分发生不同程度的变异, 且多发生于沙化中后期; 在高寒草甸沙化土壤中 HCl-P、 $\text{NaOH-P}$  和 Resin-Pi 是植物生长重要的磷源。

**关键词:** 高寒草甸; 草地沙化; 磷素分级; 有机磷; 无机磷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0065-07

中图分类号: S812.2

**文献参数:** 李冬梅, 尹霞, 李良安, 等. 沙化对高寒草甸土壤磷素组分的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 65-71. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.009; Li Dongmei, Yin Xia, Li Liangan, et al. Effects of desertification on phosphorus fractions of alpine meadow soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 65-71.

## Effects of Desertification on Phosphorus Fractions of Alpine Meadow Soils

Li Dongmei<sup>1,2</sup>, Yin Xia<sup>1</sup>, Li Liangan<sup>1,2</sup>, Liu Shuying<sup>1</sup>, Gao Yongheng<sup>2</sup>, Wang Ping<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** [Objective] Soil phosphorus fractions determine the migration and availability of phosphorus during soil evolution. The spatial distribution characteristics of soil phosphorus fractions in alpine meadows under different desertification levels were studied in order to provide a scientific reference for vegetation restoration in sandy meadows. [Methods] The modified Hedley phosphorus classification method was used to determine changes in phosphorus fraction in alpine meadow soils under different degrees of desertification (non-desertification; and light, medium and heavy desertification) using desertified Zoige alpine meadow soils on the Qinghai-Tibet Plateau. [Results] ① Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, active phosphorus, and water content decreased significantly ( $p < 0.05$ ) with increasing sand content; pH value increased significantly ( $p < 0.05$ ). ② Soil Resin-Pi,  $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ ,  $\text{NaOH-P}$ , D.HCl-Pi, and C.HCl-P contents all decreased significantly ( $p < 0.05$ ) with increasing sand content. Organic phosphorus fractions decreased more significantly than inorganic phosphorus fractions under moderate and severe desertification. ③ Correlation analysis showed that the conversion of soil phosphorus fractions during desertification in alpine meadows occurred mainly between D.HCl-Pi and  $\text{NaHCO}_3\text{-P}$  and  $\text{NaOH-Po}$ . HCl-P,  $\text{NaOH-P}$ , and Resin-Pi were important phosphorus sources for plant growth. [Conclusion] Desertification produced significant effects on

收稿日期: 2023-02-06

修回日期: 2023-04-20

资助项目: 国家重点研发计划项目“若尔盖退化高寒草地恢复关键过程研究”(2016YFC0501802)

第一作者: 李冬梅(1997—), 女(汉族), 甘肃省张掖市人, 硕士研究生, 研究方向为高寒草地土壤磷素循环。Email: 1447358335@qq.com。

通信作者: 王平(1966—), 男(汉族), 甘肃省成县人, 博士, 教授, 主要从事农业生态学和植物营养与施肥研究。Email: wp1826@126.com。

soil carbon, nitrogen, moisture and pH value, and on phosphorus fractions. Desertification also produced different degrees of variability in soil carbon, nitrogen, moisture, and pH value, and on phosphorus fractions, and mostly occurred in the middle and late stages of desertification. HCl-P, NaOH-P, and Resin-Pi were important phosphorus sources for plant growth in desertified alpine meadow soils.

**Keywords:** alpine meadows; grassland desertification; phosphorus grading; organic phosphorus; inorganic phosphorus

磷是土壤中的重要营养元素,磷储存和供应能力对植物的健康生长、微生物的生存和土壤生态系统的稳定极为重要<sup>[1]</sup>。草地是陆地生态系统中分布最广泛的植被类型,约占中国国土总面积的 40%<sup>[2-3]</sup>。在草地生态系统中,磷素在减缓土壤退化<sup>[4]</sup>和控制能量的贮存和迁移等<sup>[5]</sup>方面发挥着至关重要的作用;同时,磷素也是维持草地土壤生态系统生产力及延缓全球气候变化的重要因子之一;另一方面,土壤磷素存在空间异质性并受到诸多因素(如母质、气候、等)的调控与制约<sup>[3]</sup>。了解土壤磷素形态的空间分布及动态变化有助于预测草地退化过程中土壤磷形态的迁移转化方向及生物有效性,从而为采用合理的措施维持草地资源可持续发展提供科学依据。

青藏高原是世界上对全球气候最敏感的地区之一,易受到全球气候变化和人类活动的影响<sup>[6]</sup>。高寒草甸作为青藏高原主要植被类型,在青藏高原生态安全屏障建设与畜牧业发展中具有极其重要的作用<sup>[6]</sup>。然而,近年来沙化引发高寒草甸的持续退化和牧草产量的不断下降<sup>[7]</sup>,使得青藏高原生态安全和区域可持续发展面临严重威胁<sup>[8]</sup>。据报道,川西北草地沙漠化面积已达 110.71 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>,若沙化面积继续扩张,其恢复治理难度将大幅提升。目前,该区已有的研究主要集中在沙化过程对高寒草地植物群落组成、土壤碳氮以及微生物属性等方面<sup>[10-14]</sup>,而沙化过程对土壤磷的影响研究则多为土壤全磷和速效磷含量变化及影响因素等方面的研究<sup>[15-17]</sup>;但针对沙化影响高寒草甸土壤磷素赋存形态及转化特征的研究鲜见报道。本文以不同沙化程度的高寒草甸土壤为研究对象,采用修正后的 Hedley 磷素分级方法,探讨沙化过程中高寒草甸土壤磷素形态特征及其与土壤碳氮磷、水分和 pH 值的关系,以期为青藏高原沙化草甸的恢复和磷素管理提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处青藏高原东部,位于四川省阿坝藏族羌族自治州若尔盖县唐克乡境内,地理坐标为 33°19'N, 102°60'E,海拔 3 490 m。气候类型为大陆性高原寒温带季风型气候,年均降水量 791.95 mm,降水期主要

集中在 5—10 月期间,年均温为 1.1 °C,最冷月平均气温可以达到 -10.3 °C,而最热月平均气温则为 10.9 °C,极端最低气温 -36 °C,年均日照时间 2 158.7 h,太阳辐射年总量为 6 194 MJ/m<sup>2</sup>。具有昼夜温差大、日照充足和太阳辐射强的特点。研究区内土壤类型主要为高寒草甸土,植物群落的优势物种有垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、四川蒿草(*Kobresia setchwanensis*)和早熟禾(*Poa pratensis*)等物种<sup>[12,14]</sup>。

### 1.2 土壤样品采集与制备

2021 年 8 月对研究区进行实地调查时,选择有连续沙化梯度的高寒草甸进行样品采集。高寒草甸面积约为 4 hm<sup>2</sup>,其中约有 20%发生了沙化。对沙化草甸的划分标准,依据草地植物群落盖度的高低差异,将沙化草地划分为:未沙化草甸(NDG, non-desertification grassland,盖度 90%);轻度沙化草甸(LDG, light desertification grassland,盖度 70%);中度沙化草甸(MDG, medium desertification grassland,盖度 45%)和重度沙化草甸(HDG, heavy desertification grassland,盖度 10%)<sup>[12,18]</sup>。在 4 种不同沙化程度的样地随机设置 4 个 1 m×1 m 的样方,在每个样方内,采用“五点法”随机进行多点采样混合;用直径为 5 cm 的管型土钻采集 0—20 cm 表层土壤。待土壤样品自然风干后,按照指标测定的要求分别通过不同孔径的土壤筛后,进行室内检测分析。

### 1.3 测定指标与方法

本研究磷素分级采用 Tiessen 等<sup>[19]</sup>修正后的 Hedley 磷分级方法测定,操作流程:称取过 0.149 mm 土壤筛的风干土壤样品 0.5 g 放于干净的 50 ml 离心管中,随后对土壤各形态磷组分进行逐级连续浸提。其中所用浸提剂分别为阴离子树脂颗粒;0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>, 0.1 mol/L NaOH, 1.0 mol/L HCl 和浓盐酸。各组分浸提需在严格的控制条件下进行提取(24 °C, 16 h, 1 000 r/min)。残留态磷(Residual-P)利用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮提取,最后运用钼锑抗比色法测定各磷组分含量,其中有机磷组分含量通过差减法计算获得。

此外,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;pH 值采用

电极法,土水比为1:2.5;土壤含水量(SWC)采用烘干法测定;土壤速效磷(AP)采用 $\text{NH}_4\text{F-HCl}$ 法测定;土壤全磷(TP)采用 $\text{NaOH}$ 熔融钼锑抗比色法测定<sup>[20]</sup>。

#### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2016对试验原始数据进行整理汇总,通过单因素方差分析(one way ANOVA)中的LSD法对不同沙化程度各土壤磷组分进行显著性检验分析,利用SPSS 26.0进行相关性分析(correlate Pearson)确定土壤各形态磷组分与土壤碳、速效磷和pH值的关系。图表绘制均由Origin 2019软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同沙化程度土壤碳氮、水分和pH的变化

如表1所示,沙化降低了SOC, TN和SWC的含量。与未沙化草甸相比,中度和重度沙化明显降低了土壤碳、氮和土壤含水量指标。在所有指标中, SOC

下降幅度最大,在中度和重度沙化下分别减少了68.45%和82.63%;而TN在中度沙化和重度沙化下分别下降了73.49%和81.69%。与SOC和TN不同的是,SWC在轻度沙化时其含量就已出现锐减。在轻度沙化、中度沙化和重度沙化时分别下降43.19%, 58.44%和74.69%。不同沙化程度土壤pH值为6.00~6.62。在轻度沙化、中度沙化和重度沙化时,土壤pH值明显上升。

### 2.2 不同沙化程度土壤全磷和速效磷的变化

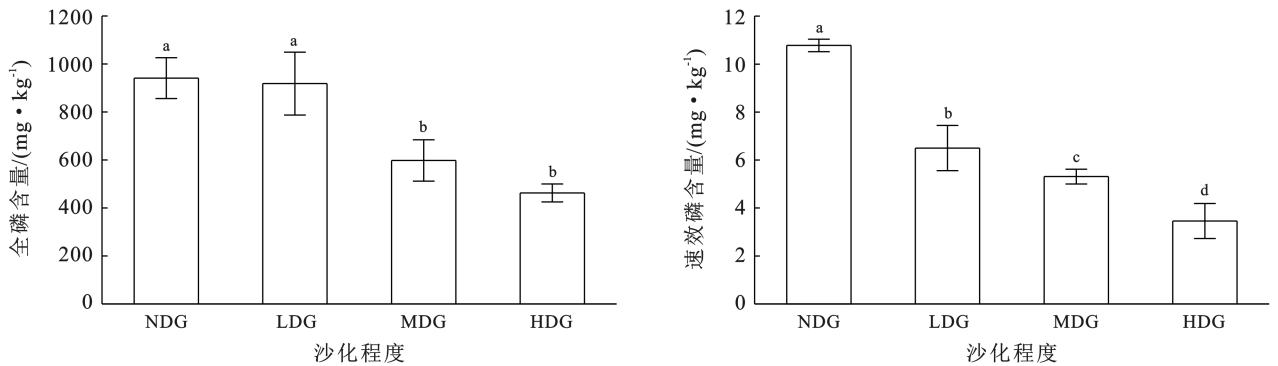
由图1可见,不同沙化程度草甸TP含量为462.57~941.04 mg/kg。与未沙化草甸相比,中度沙化和重度沙化草甸土壤TP含量显著低于未沙化草地( $p < 0.05$ ),且减少幅度为36.47%~50.84%。不同沙化程度草甸AP含量为3.46~10.78 mg/kg。沙化降低了AP的含量,在轻度沙化、中度沙化和重度沙化下减少比率分别为39.73%, 50.71%和67.90%。随着沙化程度的加剧,土壤TP和AP含量均呈递减趋势。

表1 不同沙化程度对土壤碳氮、水分和pH值的影响

Table 1 Effects of different degrees of desertification on soil carbon, nitrogen, moisture and pH value

指标	未沙化草地	轻度沙化	中度沙化	重度沙化
有机碳/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	54.42±3.79 <sup>a</sup>	46.82±4.13 <sup>b</sup>	17.17±2.86 <sup>c</sup>	9.45±2.29 <sup>d</sup>
全氮/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	4.15±0.37 <sup>a</sup>	3.19±0.32 <sup>b</sup>	1.10±0.16 <sup>c</sup>	0.76±0.07 <sup>c</sup>
土壤含水量/%	22.76±2.73 <sup>a</sup>	12.93±0.94 <sup>b</sup>	9.46±1.21 <sup>c</sup>	5.76±0.14 <sup>d</sup>
土壤pH值	6.00±0.02 <sup>d</sup>	6.31±0.02 <sup>c</sup>	6.56±0.02 <sup>b</sup>	6.62±0.03 <sup>a</sup>

注:不同小写字母表示不同沙化程度之间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。



注:不同小写字母表示不同处理之间差异显著( $p < 0.05$ )。NDG表示未沙化草地;LDG表示轻度沙化;MDG表示中度沙化;HDG表示重度沙化。下同。

图1 不同沙化程度土壤全磷和速效磷含量变化特征

Fig.1 Characteristics of changes in total phosphorus and active phosphorus content of soils with different degrees of desertification

### 2.3 不同沙化程度土壤磷组分变化

2.3.1 土壤无机磷组分变化 由图2可以看出,在不同沙化程度土壤中,树脂态磷(Resin-Pi)、碳酸氢钠无机磷( $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ )和氢氧化钠无机磷( $\text{NaOH-Pi}$ )含量均较低。

在不同沙化程度下,Resin-Pi,  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaOH-Pi}$ 含量范围分别为9.66~19.02 mg/kg, 9.82

~23.43 mg/kg, 22.58~47.66 mg/kg。不同沙化程度草甸土壤Resin-Pi,  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaOH-Pi}$ 含量显著低于未沙化草甸( $p < 0.05$ );不同沙化程度降幅分别为2.98%~50.71%, 10.89%~58.08%和8.92%~52.63%。不同沙化程度土壤中稀盐酸无机磷(D.HCl-Pi)和浓盐酸无机磷(C.HCl-Pi)含量分别为94.43~143.74 mg/kg, 33.18~42.75 mg/kg;不同沙

化程度土壤中 D. HCl-Pi 含量最高,为土壤无机磷组分的主要存在形式。随着沙化程度的加剧,土壤无机磷含量均有所降低,具体表现为:未沙化>轻度沙化

>中度沙化>重度沙化,且土壤无机磷组分含量的锐减多发生在轻度沙化到中度沙化和重度沙化的过渡阶段。

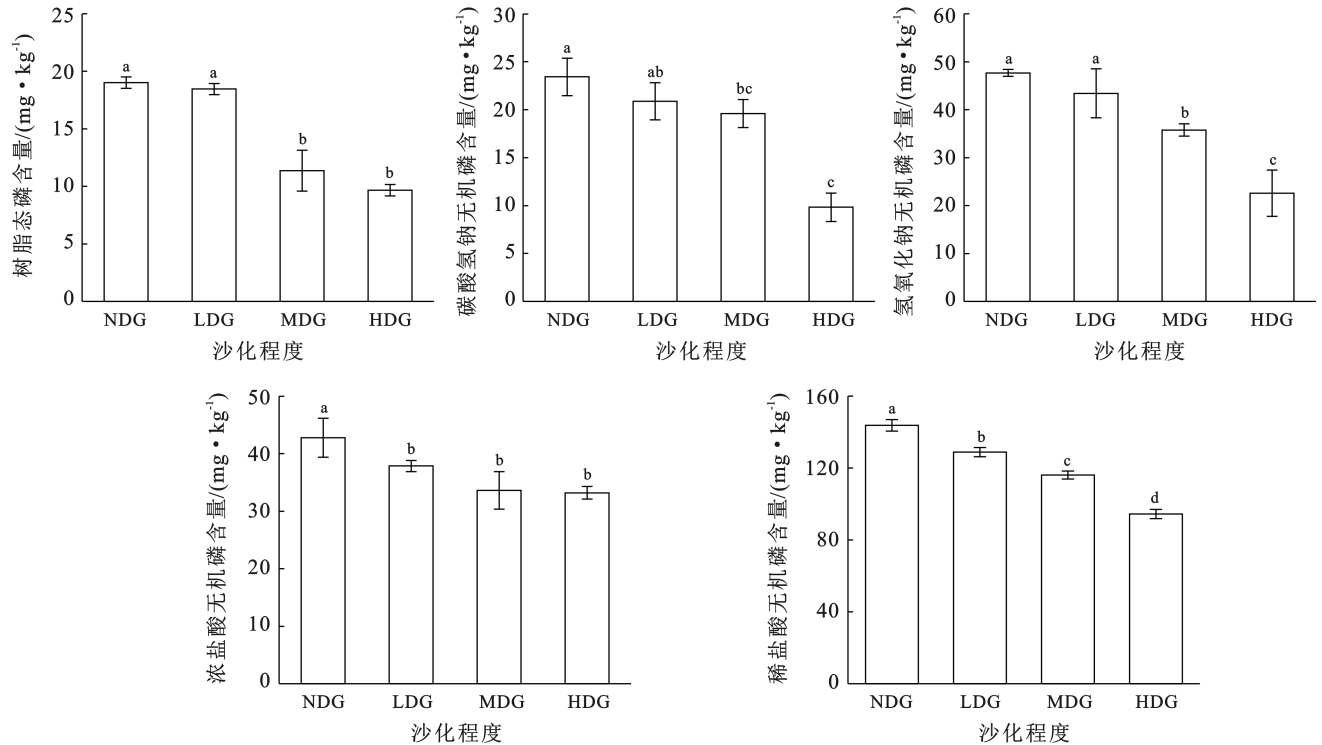


图 2 不同沙化程度土壤无机磷组分变化特征

Fig.2 Characteristics of changes in organic phosphorus fraction of soils with different degrees of desertification

2.3.2 土壤有机磷组分和残留态的变化 有机磷的 3 个组分中:氢氧化钠有机磷(NaOH-Po)>浓盐酸有机磷(C. HCl-Po)>碳酸氢钠有机磷(NaHCO<sub>3</sub>-Po)。由图 3 研究结果可知, NaOH-Po, C. HCl-Po 和 NaHCO<sub>3</sub>-Po 含量变化范围分别为 54.42~254.66 mg/kg, 62.10~96.32 mg/kg, 10.63~21.26 mg/kg。与未沙化草甸相比, 3 种沙化程度土壤有机磷组分含量均显著低于未沙化草甸 ( $p < 0.05$ ); 其中 NaOH-Po 组分减少幅度最大。与未沙化草甸相比, 其含量在轻度沙化、中度沙化和重度沙化下分别降低了 21.04%, 61.94% 和 78.63%。不同沙化程度 Residual-P 含量变化呈先增加后降低的趋势, 但差异并不显著。

#### 2.4 不同沙化程度土壤磷组分组成变化

由图 4 可知, 在不同沙化程度土壤中各形态磷组分含量及所占比例各不相同, 磷形态的不同也意味着其对全磷和速效磷的贡献程度也有很大差异。在本研究区域土壤中潜在活性磷组分 NaOH-P 在全磷总量中的占比为 16.04%~32.35%, 在土壤中所占比率相对较高。从相对含量变化上来看, 随着沙化程度的加剧, 土壤中 Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-P 和 NaOH-P 在全

磷中所占比例总体呈下降趋势; 而 D. HCl-Pi 和 C. HCl-P 总体呈增加的趋势。不同沙化程度 Residual-P 占全磷比例总体呈现先增加后降低的趋势, 但差异并不显著, 并未出现一致的响应。

#### 2.5 土壤磷组分与碳、速效磷和 pH 值的相关关系

表 2—3 分别为土壤各形态磷组分之间及各磷形态与土壤 SOC, AP 和 pH 值的相关性分析结果。由表 2 可以看出, Resin-Pi 和各磷组分均呈现极显著 ( $p < 0.01$ ) 正相关关系; Resin-Pi 与 D. HCl-Pi, NaOH-Po 和 NaHCO<sub>3</sub>-Po 组分的相关系数分别为 0.910, 0.965, 0.913; NaHCO<sub>3</sub>-Pi 与 D. HCl-Pi 和 C. HCl-Pi 相关系数为 0.921, 0.867; NaOH-Pi 和 D. HCl-Pi 相关系数为 0.940; D. HCl-Pi 与 NaOH-Po 的相关系数则高达 0.958。

通过上述研究结果可以推断, 中稳性磷(D. HCl-Pi)与活性磷(NaHCO<sub>3</sub>-P)和潜在活性磷(NaOH-Po)的迁移运转为本研究区土壤中磷素组分主要的迁转方向。由 3 可以看出, SOC 与各磷组分均为显著相关关系, 与土壤 pH 值均呈极显著 ( $p < 0.01$ ) 负相关关系。



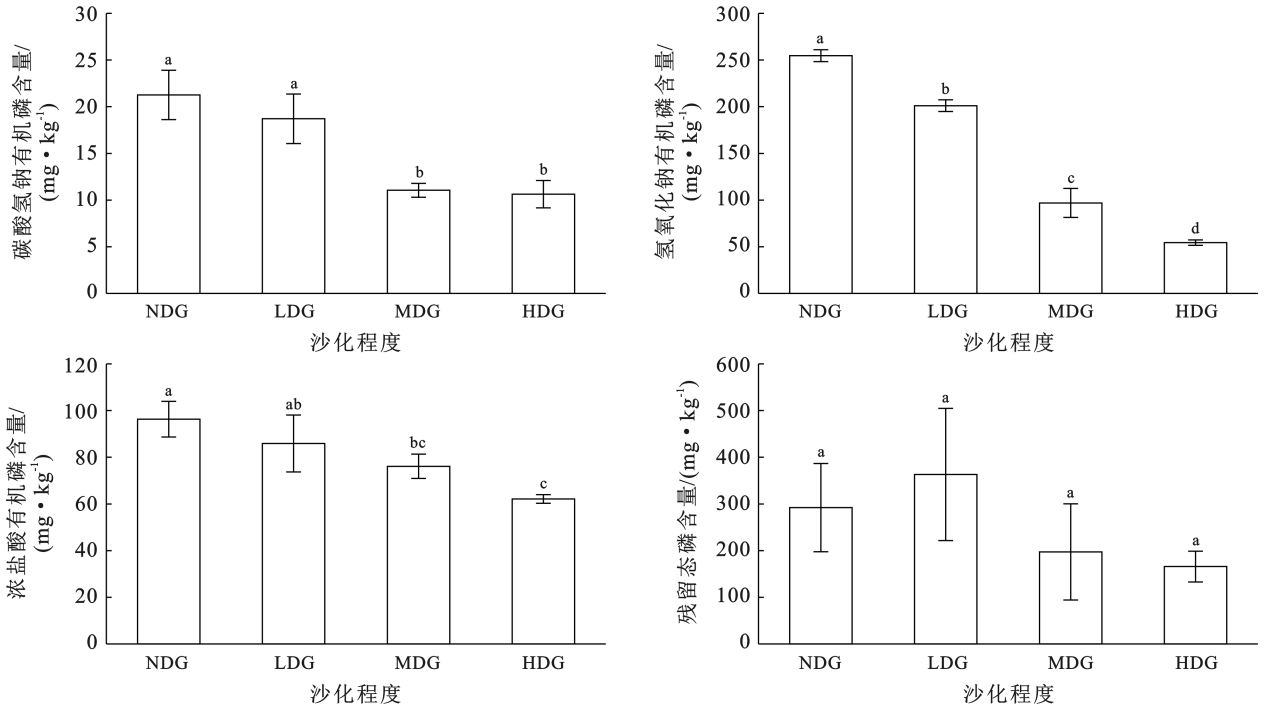


图 3 不同沙化程度土壤有机磷组分和残留态的变化特征

Fig.3 Characteristics of changes in organic phosphorus fraction and residual state of soils with different degrees of desertification

表 2 土壤各形态磷组分之间的相关关系

Table 2 Correlations between phosphorus fractions of soil forms

磷形态	树脂态磷 (Resin-Pi)	碳酸氢钠 无机磷 (NaHCO <sub>3</sub> -Pi)	氢氧化钠 无机磷 (NaOH-Pi)	稀盐酸 无机磷 (D.HCl-Pi)	浓盐酸 无机磷 (C.HCl-Pi)	碳酸氢钠 有机磷 (NaHCO <sub>3</sub> -Po)	氢氧化钠 有机磷 (NaOH-Po)	浓盐酸 有机磷 (C.HCl-Po)	残留态磷 (Residual-P)
树脂态磷 (Resin-Pi)	1.000	0.791 **	0.872 **	0.910 **	0.753 **	0.913 **	0.965 **	0.820 **	0.619 *
碳酸氢钠无机磷 (NaHCO <sub>3</sub> -Pi)		1.000	0.909 **	0.921 **	0.632 *	0.735 **	0.826 **	0.867 **	0.353
氢氧化钠无机磷 (NaOH-Pi)			1.000	0.940 **	0.732 **	0.850 **	0.899 **	0.853 **	0.442
稀盐酸无机磷 (D.HCl-Pi)				1.000	0.766 **	0.857 **	0.958 **	0.914 **	0.538
浓盐酸无机磷 (C.HCl-Pi)					1.000	0.849 **	0.826 **	0.669 *	0.384
碳酸氢钠有机磷 (NaHCO <sub>3</sub> -Po)						1.000	0.925 **	0.835 **	0.368
氢氧化钠有机磷 (NaOH-Po)							1.000	0.870 **	0.559
浓盐酸有机磷 (C.HCl-Po)								1.000	0.326
残留态磷 (Residual-P)									1.000

注: \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。\* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。下同。

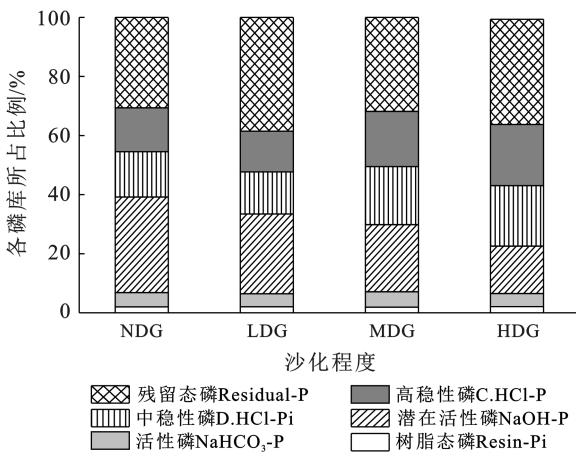


图 4 不同沙化程度土壤磷组分相对含量变化

Fig.4 Changes in relative content of phosphorus fractions in soils with different degrees of desertification

表 3 土壤各形态磷组分与碳、速效磷和 pH 值之间的相关关系  
Table 3 Correlation between phosphorus fractions and carbon, active phosphorus and pH value of soils

磷形态	有机碳 (SOC)	酸碱度 (pH 值)	速效磷 (AP)
树脂态磷 (Resin-Pi)	0.970 **	-0.894 **	0.822 **
碳酸氢钠无机磷 (NaHCO <sub>3</sub> -Pi)	0.794 **	-0.743 **	0.774 **
氢氧化钠无机磷 (NaOH-Pi)	0.869 **	-0.845 **	0.816 **
稀盐酸无机磷 (D.HCl-Pi)	0.933 **	-0.918 **	0.932 **
浓盐酸无机磷 (C.HCl-Pi)	0.821 **	-0.877 **	0.847 **
碳酸氢钠有机磷 (NaHCO <sub>3</sub> -Po)	0.918 **	-0.894 **	0.832 **
氢氧化钠有机磷 (NaOH-Po)	0.973 **	-0.964 **	0.909 **
浓盐酸有机磷 (C.HCl-Po)	0.877 **	-0.830 **	0.838 **
残留态磷 (Residual-P)	0.635 *	-0.488	0.458
有机碳 (SOC)	1.000	-0.932 **	0.403
酸碱度 (pH 值)		1.000	-0.553
速效磷 (AP)			1.000

## 3 讨论

### 3.1 沙化对土壤碳氮、水分和 pH 值的影响

沙化对高寒草甸土壤 SOC, TN, SWC 和 pH 值产生不同程度的影响。随着沙化程度的加剧, SOC 和 TN 含量均出现显著降低 ( $p < 0.05$ ); 其中 SOC 减幅最大。这与大多数研究<sup>[10-13, 21]</sup>结果基本一致。沙化导致地表植被的丧失, 从而引起土壤质地的退化, 这可能是土壤中碳流失的重要原因之一; 另外, 在表层土壤中, 碳素的累积途径主要是通过植物地上生物量和地下生物量的碳输入实现<sup>[18, 21]</sup>; 而在沙化过程中随着土壤含水量的骤减, 致使植物生物量和盖度大幅减少; 这就使得植物向土壤中输入碳的能力也逐步减弱, 最终导致土壤中有有机碳的储量明显下降<sup>[21]</sup>。随着沙化程度的加剧, 土壤质地退化进程也随之加快, 导致土壤中细颗粒物减少, 进而引起土壤全氮含量的逐步降低。本研究结果显示, 土壤养分的骤减流失出现在沙化的中后期, 即轻度沙化至中度和重度沙化演化时期; 而在沙化前期, 未沙化至轻度沙化时变幅则相对较小, 这与其他研究者在青藏高原不同区域沙化草地中的研究<sup>[22-23]</sup>结果一致。土壤水分和 pH 值可作为表征土壤沙化的重要指标<sup>[24]</sup>。本研究结果表明, 随着沙化程度的加剧, SWC 也随之降低, 其含量在轻度沙化时已呈现显著下降趋势; 在沙化后期, SWC 减幅更是高达 74.69%。周启龙<sup>[25]</sup>在藏西沙化草地中的研究结果也表明, 随着沙化程度的加深, 土壤含水量逐渐降低, 且差异显著, 这与本研究结果相同。这可能归因于在草地沙化演变过程中, 随着土壤养分细颗粒物的流失, 粗颗粒物被保留并不断堆积, 土壤逐步粗化, 使其蒸发能力变强, 进而导致土壤含水量降低<sup>[26]</sup>。在本研究区土壤中, 土壤 pH 值随着沙化程度的加剧, 呈现上升趋势。文勇立等<sup>[24]</sup>在若尔盖不同沙化程度牧场草地土壤中的研究结果显示, 除向东牧场外, 沙化草地土壤 pH 值都高于周围沙化程度较轻的草地, 说明随着沙化程度的加剧, 土壤 pH 值升高。草地沙化后, 使得土壤酸碱度发生改变, 随着沙化程度的加剧, 使得土壤的碱性逐步提升。这可能是因为土壤含水量骤减, 致使土壤逐步趋于碱化, 最终导致土壤 pH 值逐渐升高<sup>[24]</sup>。

### 3.2 沙化对全磷和土壤速效磷的影响

全磷即土壤中各形态磷素含量的总和, 是表征土壤磷素储存能力大小的重要指标<sup>[27]</sup>。本研究发现高寒草甸发生沙化后明显影响了土壤全磷的含量。随着沙化程度的加剧, 土壤全磷含量显著降低, 在沙化后期其减幅已由轻度沙化时的 2.41% 增加至

50.84%; 这与周启龙<sup>[25]</sup>和雷玮倩等<sup>[27]</sup>的研究结果基本一致。土壤中磷含量的多寡主要是由成土母质中的磷含量高低来决定的, 而本研究区域为典型的高寒草甸生态系统, 在天然高寒草甸生态系统中, 土壤中的磷素来源没有人工外源添加输入补给, 需依靠大气沉降来补充。而该区域大气磷沉降贡献很微弱<sup>[28]</sup>, 同时受自然环境因子的影响也较大。在风蚀和冻融等综合作用的影响下, 加快草地沙化的演化进程, 进而引起土壤养分的快速流失, 最终致使土壤全磷含量显著下降<sup>[27]</sup>, 这可能是草地沙化后土壤全磷呈下降趋势的重要原因。

速效养分是指可以被植物直接吸收利用的养分, 而速效磷含量受外界非生物因素干扰的影响较大<sup>[29]</sup>, AP 含量在未沙化土壤中最高为 10.78 mg/kg, 而随着沙化的加剧 AP 含量明显降低, 在重度沙化时减幅为 67.90%。李世龙<sup>[26]</sup>在青藏高原东缘玛曲沙化草地中的研究结果显示, AP 含量在轻度以上沙化草地中显著降低。这可能是因为草地退化程度逐步加剧后导致土壤养分快速流失, 使得土壤速效磷下降。

### 3.3 沙化对土壤磷组分的影响

在磷素组分相互转化的过程中, 各磷素形态的含量及转化方向是决定植物可利用吸收有效磷源多寡的重要因素<sup>[30]</sup>。随着沙化程度的加剧, 土壤中 Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-P, NaOH-P, D. HCl-Pi 和 C. HCl-P 含量均显著 ( $p < 0.05$ ) 下降; 其中 NaOH-Po 含量变化最为明显, 在重度沙化时其变幅高达 78.63%。这可能是由于随着沙化程度的加剧 SOC 含量骤减, 使得土壤有机磷组分含量急速下降<sup>[31]</sup>。

从相对数量来看, 沙化土壤中 NaOH-P 占全磷总量的 16.04%~32.35%, 其比例较其他组分占比相对较高, 说明未发生沙化时, 土壤中潜在的、可供迁移转化的磷素较多, 这与关鑫鑫等<sup>[3]</sup>的研究结果具有相似性。从相对含量变化上来看, 随沙化程度的加剧, 土壤 Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-P 和 NaOH-P 占全磷的比例总体呈下降趋势, 而 D. HCl-Pi 和 C. HCl-P 在全磷中的占比呈上升趋势。而从绝对含量变化上来看, 随着沙化程度的加剧, 除 Residual-P 外, 土壤各磷素形态均出现明显的下降, 这与邵丹<sup>[31]</sup>的研究结果相似。这可能是因为随着土壤沙化程度的加剧, 全磷含量逐步降低, 进而影响了各磷素组分的含量。

一般认为, 各形态磷组分与速效磷之间存在一定的关系, 土壤速效磷与某形态磷组分的相关性愈高, 则该磷组分形态的有效性也越大<sup>[32]</sup>。相关性分析结果表明, 除 Residual-P 外, 各磷组分与 AP 均呈极显著 ( $p < 0.01$ ) 正相关关系。表明不同形态有机磷组分可

以经矿化等形式转变为有效性较强的无机磷形态,但各组分之间的相关程度存在差异,其中与 HCl-P, NaOH-P 和 Resin-Pi 相关系数较大,表明这些组分在植物生长过程中有效性相对较强;这与吴璐璐等<sup>[32]</sup>的研究结果相似。

## 4 结论

(1) 高寒草甸土壤 SOC, TN, TP, AP 和 SWC 在沙化过程中呈现显著 ( $p < 0.05$ ) 降低变化,而且在中度沙化和重度沙化时出现快速下降,表明在沙化过程中土壤养分和水分的骤然流失多发生于沙化的中后期;而土壤 pH 值随着沙化程度的加剧呈显著升高 ( $p < 0.05$ )。

(2) 高寒草甸土壤 Resin-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-P, NaOH-P, D.HCl-Pi 和 C.HCl-P 含量均随着沙化程度的加剧显著 ( $p < 0.05$ ) 降低。其中在沙化中后期各有机磷组分含量较无机磷变化更为明显,而在轻度沙化阶段时变化相对较小。表明在沙化中后期随着 SOC 含量的锐减,土壤磷素的降低以有机磷为主。

(3) 高寒草甸沙化过程中土壤磷组分转化主要发生在 D.HCl-Pi, NaHCO<sub>3</sub>-P, NaOH-Po 组分之间。土壤磷组分与 AP 存在极显著 ( $p < 0.01$ ) 正相关关系,但各组分之间的相关程度存在差异;其中与 HCl-P, NaOH-P 和 Resin-Pi 相关系数较大,说明这些组分在植物生长过程中生物有效性较强。

### [参 考 文 献]

- [1] Tian Liyan, Guo Qingjun, Yu Guirui, et al. Phosphorus fractions and oxygen isotope composition of inorganic phosphate in typical agricultural soils [J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124622.
- [2] 吴金凤, 刘鞠善, 李梓萌, 等. 草地土壤磷循环及其对全球变化的响应[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(6): 102-111.
- [3] 关鑫鑫, 王传宇, 李翠兰, 等. 青藏高原不同类型草地土壤磷素分布及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 351-359.
- [4] Liu Changcheng, Liu Yuguo, Guo Ke, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium addition on the productivity of a karst grassland plant functional group and community perspectives [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 117: 84-95.
- [5] 黄玫, 王娜, 王昭生, 等. 磷影响陆地生态系统碳循环过程及模型表达方法[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 471-481.
- [6] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [7] 赵改红, 旦增塔庆, 魏学红. 青藏高原高寒草地沙化特征的研究进展[J]. *草原与草坪*, 2012, 32(5): 83-89.
- [8] 刘文民, 田鹏, 刘利昆, 等. 青藏高原典型沙化区草地土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 118-124.
- [9] 游宇驰, 李志威, 黄草, 等. 1990—2016 年若尔盖高原荒漠化时空变化分析[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1671-1680.
- [10] 万婷, 涂卫国, 席欢, 等. 川西北不同程度沙化草地植被和土壤特征研究[J]. *草地学报*, 2013, 21(4): 650-657.
- [11] 宗宁, 石培礼, 朱军涛. 高寒草地沙化过程植物群落构成及生态位特征变化[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8): 1561-1570.
- [12] 朱灵, 李易, 杨婉秋, 等. 沙化对高寒草地土壤碳、氮、酶活性及细菌多样性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 350-358.
- [13] 费凯, 胡玉福, 舒向阳, 等. 若尔盖高寒草地沙化对土壤活性有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 327-330, 336.
- [14] 蒋双龙, 胡玉福, 蒲琴, 等. 川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4644-4653.
- [15] 许世洋, 李雪萍, 李敏权, 等. 青藏高原高寒草甸退化对草地群落多样性及土壤特性的影响[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(8): 20-27.
- [16] 李邵宇, 孙建, 王毅, 等. 青藏高原不同退化梯度草地土壤酶活性特征[J]. *草业科学*, 2020, 37(12): 2389-2402.
- [17] Cao Yingzi, Wang Xiaodan, Lu Xuyang, et al. Soil Organic carbon and nutrients along an alpine grassland transect across Northern Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(4): 564-573.
- [18] 徐干君, 柴永煜, 颜亮, 等. 不同退化程度高寒草甸生态系统碳通量[J]. *草业科学*, 2022, 39(9): 1733-1742.
- [19] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction [M] // Carter M R, Gregorich E G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. second edition. Boca Raton, Crc Press, 1993.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 30-114.
- [21] An Hui, Li Qiaoling, Yan Xin, et al. Desertification control on soil inorganic and organic carbon accumulation in the topsoil of desert grassland in Ningxia, Northwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 348-355.
- [22] Hu Yufu, Jiang Shuanglong, Yuan Shu, et al. Changes in soil organic carbon and its active fractions in different desertification stages of alpine-cold grassland in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(1): 348-363.
- [23] 马丽. 红原高寒沙化草地土壤特征及其与地形因子的关系研究[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2021.

- [16] Ke Zengming, Liu Xiaoli, Ma Lihui, et al. Excavated farmland treated with plastic mulching as a strategy for groundwater conservation and the control of soil salinization [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(16):3036-3048.
- [17] Evertsz C J G, Mandelbrot B B. *Multifractal measures [M]*. *Chaos & Fractals New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, 1992,984.
- [18] Qi Fei, Zhang Ronghua, Liu Xia, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,184:45-51.
- [19] Vázquez E V, Miranda J G V, Paz-Ferreiro J. A multifractal approach to characterize cumulative rainfall and tillage effects on soil surface micro-topography and to predict depression storage [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7:2989-3004.
- [20] Zhu Qing, Lin Henry. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales [J]. *Geoderma*, 2011,163:45-54.
- [21] Fang Kaikai, Li Huike, Wang Zhikang, et al. Comparative analysis on spatial variability of soil moisture under different land use types in orchard [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016,207:65-72.
- [22] Fatholouloumi S, Vaezi A R, Firozjaei M K, et al. Quantifying the effect of surface heterogeneity on soil moisture across regions and surface characteristic [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,596:126132.

(上接第 71 页)

- [24] 文勇立,孙静,王永,等.若尔盖沙化草地土壤 pH、水、盐空间异质性研究[C].北京:中国畜牧兽医学学会家畜生态分会第七届全国代表大会暨学术研讨会论文集,2008.
- [25] 周启龙.藏西沙化草地根系分布与土壤理化性质的关系[J].*水土保持通报*,2021,41(1):1-5.
- [26] 李世龙.青藏高原东缘玛曲沙化高寒草地土壤理化性质[J].*中国沙漠*,2022,42(6):44-52.
- [27] 雷玮倩,胡玉福,杨泽鹏,等.垦殖对川西北高寒草地土壤中不同磷组分含量的影响[J].*草业学报*,2019,28(5):36-45.
- [28] 魏志标,柏兆海,马林,等.中国天然草地氮磷流动空间特征[J].*中国农业科学*,2018,51(3):523-534.
- [29] 姜丽娜,马洁,刘建康,等.毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征[J].*水土保持通报*,2022,42(5):1-7.
- [30] 贾莉洁,李玉会,孙本华,等.不同管理方式对土壤无机磷及其组分的影响[J].*土壤通报*,2013,44(3):612-616.
- [31] 邵丹.若尔盖退化沼泽湿地的土壤磷素组分变化特征研究[D].四川 成都:四川农业大学,2017.
- [32] 吴璐璐,柳小琪,张泽兴,等.吉林省典型土壤磷素形态及有效性[J].*西北农业学报*,2021,30(5):737-745.

(上接第 80 页)

- [20] 麻浩,张桦,马林,等.无灌溉管件防护梭梭荒漠造林新技术及其示范推广[J].*中国科学(生命科学)*,2014,44(3):248-256.
- [21] 王泽,梁燕,阿不都克玉木·米吉提,等.防护条件下梭梭幼苗生长及养分吸收特性[J].*干旱区研究*,2017,34(1):112-118.
- [22] 朱琳,晋强,胡荻.石膏基棉秆复合材料防护管件的制备及防护性能研究[J].*新疆农业大学学报*,2018,41(4):292-297.
- [23] 曹辉,冯勇,晋强.石膏基棉花秸秆矿渣复合砌块的试制研究[J].*新型建筑材料*,2013,40(1):55-56,65.
- [24] 龚建清,方萍,吴慧敏.普通硅酸盐水泥对石膏基混合胶结材的改性研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,1997,24(6):79-84.
- [25] 范严伟,王延祥,朱鹏程,等.竖管地表滴灌下风沙土稳定入渗率与湿润体估算模型[J].*农业工程学报*,2021,37(7):103-111.
- [26] 范严伟,王延祥,史金红,等.竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤水分运移特性对比试验研究[J].*水土保持学报*,2022,36(6):163-170.
- [27] 王建东,龚时宏,许迪,等.地表滴灌条件下水热耦合迁移数值模拟与验证[J].*农业工程学报*,2010,26(12):66-71.
- [28] Helms T C, Deckard E, Goos R J, et al. Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence [J]. *Agron*, 1996,88:662-667.