

氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤无机磷形态的影响

胡 洋¹, 丛孟菲¹, 陈 末², 侯天钰¹, 愚广灵¹,
买迪努尔·阿不来孜¹, 朱新萍^{1,3}, 贾宏涛^{1,3}

(1.新疆农业大学资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆农业大学草业学院, 乌鲁木齐 830052; 3.新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探究在全球气候变化敏感区的干旱区高寒湿地上, 氮添加对土壤无机磷形态的影响。在保护良好的巴音布鲁克高寒湿地沼泽(S)、沼泽草甸(SM)和草甸(M)布设野外原位试验, 依据巴音布鲁克草原氮沉降量, 设置 0(CK), 8(N1), 16(N2) kg·N/(hm²·a) 的施氮量, 研究短期氮添加对高寒湿地土壤无机磷形态的影响。结果表明: (1) 高寒湿地土壤全磷含量平均为 1.09 g/kg, 总无机磷平均为 492.71 mg/kg, 而总无机磷平均占全磷的 45.67%。(2) 3 种湿地类型土壤无机磷主要以 Ca—P 形态存在, 在 Ca—P 中以 Ca₁₀—P 为主, 占无机磷含量的 50.27%~64.69%。S 区土壤 Al—P、Fe—P 含量显著高于 SM 和 M 区, SM 区 Ca₂—P、Ca₈—P、O—P 含量显著高于 S 和 M 区, M 区土壤 Ca₁₀—P 含量显著高于 S 和 SM 区。(3) 氮添加显著影响高寒湿地土壤各形态无机磷的含量, 氮添加下, S 和 SM 区土壤 Al—P 含量较 CK 显著增加了 9.92%~17.35%, 而 Ca₈—P 含量显著降低 3.18%~9.36%。S 和 M 区土壤 Fe—P 含量显著降低了 3.18%~9.36%, S 区土壤 Ca₂—P 含量显著降低了 10.31%。氮添加下 3 种湿地类型土壤 O—P 含量均显著增加, 较 CK 显著增加 21.83%~25.94%。(4) 土壤 pH、有机碳、碱解氮和速效钾均是影响无机磷形态的重要因子。不同湿地类型土壤无机磷形态含量存在显著差异, 氮添加显著改变了土壤各无机磷形态含量, 主要是通过增加土壤中难利用无机磷(O—P)含量, 使高寒湿地土壤的供磷潜力降低。研究结果有助于预测未来氮沉降持续增加背景下全球高寒湿地土壤无机磷形态的变化趋势。

关键词: 氮添加; 高寒湿地; 无机磷形态
中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0252-07
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.036

Nitrogen Addition Significantly Affected the Soil Inorganic Phosphorus Forms in Bayinbuluk Alpine Wetland

HU Yang¹, CONG Mengfei¹, CHEN Mo², HOU Tianyu¹, YU Guanglin¹,
MAIDINUER Abulaiz¹, ZHU Xinping^{1,3}, JIA Hongtao^{1,3}

(1.College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;
2.College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;
3.Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052)

Abstract: In order to investigate the effects of nitrogen addition on soil inorganic phosphorus forms in alpine wetland in arid area sensitive to global climate change Field in situ experiments were arranged in the well protected Bayinbuluk alpine wetland Swamp (S), Swamp meadow (SM) and Meadow (M). According to the nitrogen deposition of Bayinbuluk grassland, the nitrogen application rates of 0 (CK), 8 (N1) and 16(N2) kg·N/(hm²·a) were set to study the effect of short~term nitrogen addition on soil inorganic phosphorus forms in alpine wetland. Results showed that: (1) The average total phosphorus content under alpine wetland soil was 1.09 g/kg, and total inorganic phosphorus was 492.71 mg/kg, and total inorganic phosphorus accounted for 45.67% of total phosphorus on average. (2) The soil inorganic phosphorus of the 3 wetland

收稿日期: 2021-11-06
资助项目: 国家自然科学基金项目(31960258, 31560171)
第一作者: 胡洋(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事高寒湿地土壤生态研究。E-mail: 1253084759@qq.com
通信作者: 朱新萍(1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事湿地土壤生态环境研究。E-mail: zhuxinping1978@163.com
贾宏涛(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事湿地土壤生态环境研究。E-mail: jht@xjau.edu.cn

types mainly exists in the form of Ca—P, and Ca_{10} —P is the main form of Ca—P, accounting for 50.27%~64.69% of the inorganic phosphorus content. The contents of soil Al—P and Fe—P in S area were significantly higher than those in SM and M area, the contents of Ca_2 —P, Ca_8 —P and O—P in SM area were significantly higher than those in S and M area, and the content of soil Ca_{10} —P in M area was significantly higher than those in S and SM area. (3) Nitrogen addition significantly affected the content of various forms of inorganic phosphorus in alpine wetland soil. Compared with CK, the content of soil Al—P in S and SM areas increased significantly by 9.92%~17.35%, and the content of Ca_8 —P decreased significantly by 3.18%~9.36%. The content of soil Fe—P in S and M areas decreased significantly by 3.18%~9.36%. The content of soil Ca_2 —P in s area decreased significantly by 10.31%. It is worth noting that under the addition of nitrogen, the soil O—P content of the 3 wetland types increased significantly, which was 21.83%~25.94% higher than that of CK. (4) RDA showed that soil pH, organic carbon, available nitrogen and available potassium were important factors affecting the form of inorganic phosphorus. In conclusion, there are significant differences in the content of inorganic phosphorus forms in different wetland types. Nitrogen addition significantly changes the content of inorganic phosphorus forms in the soil, mainly by increasing the content of difficult to use inorganic phosphorus (O—P) in the soil, so as to reduce the phosphorus supply potential of alpine wetland soil. This study is helpful to predict the changes of soil inorganic phosphorus in alpine wetlands under the background of continuous increase of nitrogen deposition.

Keywords: nitrogen addition; alpine wetland; inorganic phosphorus form

磷素是植物生长发育必不可少的元素,也是土壤中除氮素之外的第二大限制性营养元素。土壤无机磷的形态决定了土壤磷素的迁移转化和有效性,仅通过全磷或有效磷含量并不能全面的解释土壤磷的供应潜力和流失状况。故此,已有学者^[1]提出一套适用于中性和石灰性土壤中的无机磷分级体系,此方法将土壤无机磷细分为磷酸铁盐(Fe—P)、磷酸铝盐(Al—P)、闭蓄态磷(O—P)、磷酸二钙(Ca_2 —P)、磷酸八钙(Ca_8 —P)和磷灰石(Ca_{10} —P)6种形态。其中,Fe—P、Al—P和 Ca_2 —P被认为是植物易利用态,而 Ca_8 —P、 Ca_{10} —P和O—P被认为是难利用态。

人为活动致使大气氮沉降速率迅速增加,深刻影响着土壤中诸多元素的转化和循环^[2]。以往开展的氮添加研究大多以施用无机氮为主,而忽略了有机氮组分的潜在影响。越来越多的研究^[3]表明,有机氮占大气氮沉降量很大的比例(30%左右),同时有机氮沉降的比例正处于持续增加的状态。更重要的是有机氮和无机氮添加对陆地生态系统养分循环可能产生不同的影响。

氮添加可引起土壤酸化来增加土壤磷酸盐离子的扩散和磷素的有效性。另外,氮添加也可促进或抑制土壤磷酸酶活性来增加或降低土壤有机磷的矿化^[4]。Chen等^[5]发现,施用无机氮会显著降低土壤中有效磷组分,同时增加中度有效磷组分。但刘津等^[6]研究发现,有机氮的添加不会改变土壤无机磷的含量。由此可知,有机氮和无机氮对土壤磷素的影响

并不一致,还需要进一步分析。在半干旱草原和农田上的研究^[7]发现,有机氮的添加促进了难利用磷转化为低有效磷,显著增加了土壤中低有效性无机磷组分(Fe—P、Al—P、 Ca_2 —P),显著降低了难利用无机磷含量(O—P、 Ca_{10} —P、 Ca_8 —P)。但是,也有研究^[8]发现,有机氮的添加对高寒草原土壤全磷和速效磷无显著影响。因此,在不同生态系统上,关于有机氮添加对土壤磷素的影响还存在争议,需进一步明确。且目前研究多集中于森林、草原和农田生态系统,而在全球气候变化敏感区—高寒湿地生态系统上的研究较少,随着全球氮沉降速率的快速增加,研究氮添加对高寒湿地土壤无机磷形态的影响对于高寒湿地生态系统的可持续利用具有重要的指导意义。

巴音布鲁克高寒湿地是中亚干旱区典型的高寒湿地,其独特的自然景观和生态区位,使其成为维护我国西北干旱区生态系统稳定性的重要屏障。故此本研究布设野外原位试验,设置不同施氮量,来揭示短期氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤无机磷及其各形态含量的影响,可为全球高寒湿地应对气候变化的适应与管理提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州和静县内的巴音布鲁克高寒湿地进行(82°59′00″—84°35′00″E, 42°40′00″—43°00′00″N)。研究区面积

770 km²,海拔 2 300~3 042 m,属于温带大陆性干旱气候,年平均气温-4.6℃,极端最高气温为 28℃,最低为-48.1℃,年均降水量 273 mm,年蒸发量 1 250 mm,年均相对湿度 60%。根据地表积水和植被类型可划分为沼泽(S)、沼泽草甸(SM)、草甸(M)3 种类型。其中,沼泽常年处于淹水状态,水深 30~50 cm,优势植被主要有大穗苔草(*Carex rhyncho-physa*);沼泽草甸冬季处于覆雪状态,春季冰雪融化及生长季持续降雨后会出现地表积水现象,在干旱季又会出现无积水现象,土壤水分含量 50%~70%,地下水位约 120 cm,优势植被主要为黑花苔草(*Carex melanantha*)和冰草(*Agropyron cristatum*);草甸在冰雪融化及持续降雨时会出现短暂积水,常年处于干燥状态,土壤水分含量 25%~35%,优势植被主要为尖苞藁草(*Carex microglochin*)^[9]。

1.2 试验设计

选择在植物生长季结束后(2018 年 10 月),采用原位模拟方法,在巴音布鲁克高寒湿地沼泽、沼泽草甸和草甸区共布设 9 个小区(9 m×9 m),并用 1 m 高的钢质栅栏围护以防止人类及动物干扰。根据 2011 年巴音布鲁克高寒草原氮沉降量(8 kg/(hm²·a))来设置本研究施氮浓度^[10],分别为 CK(0 kg·N/(hm²·a))、N1(8 kg·N/(hm²·a))、N2(16 kg·N/(hm²·a))。按照不同氮添加浓度称取所需的尿素用量,后充分溶于蒸馏水中使用喷壶均匀喷洒于各小区,为消除水分的影响,对照也喷洒同样量的蒸馏水。

1.3 样品采集与测定

在 2019 年 10 月使用 5 点取样法采集各区内 0—10 cm 的土样,一份土样风干后过筛,测定土壤 pH、土壤碱解氮、速效磷、速效钾、全磷以及无机磷形态,另一份土样阴干备用。土壤 pH 采用水土比 1:2.5 浸提,使用 pH 计测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测

定;土壤速效磷采用分光光度计进行比色测定;土壤速效钾采用火焰光度计测定;土壤无机磷形态根据顾益初等^[1]改进的方法测定,称取土壤样品依次使用 NaHCO₃、NH₄OAc、NH₄F、Na₂CO₃、柠檬酸钠、H₂SO₄ 浸提,再采用分光光度计测定土壤各无机磷形态(Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P)含量。

1.4 数据分析

使用 R(version 4.0.2)软件对数据进行分析作图,使用 agricolae 软件包(version 1.3.3)的 LSD 来检验差异的显著性($P<0.05$),使用 SPSS 26.0 软件对数据进行双因素方差分析。使用 R 中 vegan 软件包(version 2.5.6),并选择 RDA 对土壤基础性质和土壤磷形态进行排序,并使用蒙特卡洛置换检验以分析土壤性质的显著性(permu=999)。采用 Origin 2018 软件对分析后数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 氮添加对土壤基础化学性质的影响

由表 1 可知,SM 和 M 区土壤 pH 显著高于 S 区,氮添加对 3 种湿地类型土壤 pH 无显著影响。S 区土壤有机碳含量显著高于 SM 和 M 区,M 区最低。与 CK 相比,N1 处理显著降低了 SM 区土壤有机碳含量(降低了 4.19%),N1、N2 处理显著增加了 M 区土壤有机碳含量(分别增加了 19.29%和 15.95%),但是氮添加对 S 区土壤有机碳含量无显著影响。S 区土壤碱解氮含量也显著高于 SM 和 M 区,N1、N2 处理较 CK 显著增加了 SM 和 M 区土壤碱解氮含量,但是对 S 区土壤碱解氮含量无显著影响。M 区土壤速效钾含量显著高于 SM 和 M 区,S 区最低,N2 处理较 CK 显著增加了 SM 区速效钾含量(增加了 12.50%),但是对 S 和 M 区无显著影响。可见,不同湿地土壤基础化学性质有着显著差异,且不同湿地类型土壤基础化学性质对氮添加的响应程度不同。

表 1 氮添加对高寒湿地土壤基础化学性质的影响

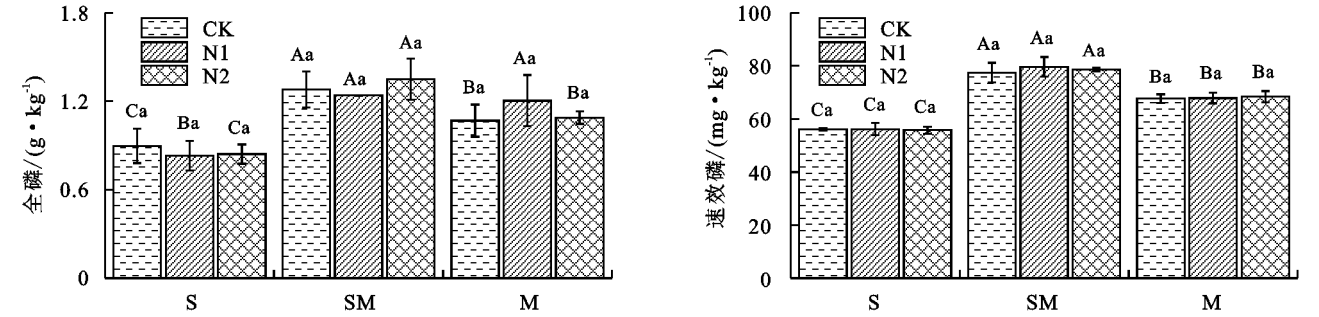
研究区域	处理	pH	有机碳/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
S	CK	7.19±0.05Ba	97.94±3.18Aa	119.25±3.17Aa	158.33±2.89Ca
	N1	7.27±0.04Ba	97.25±2.83Aa	114.64±4.16Aa	158.33±17.56Ca
	N2	7.15±0.04Ba	97.68±0.54Aa	118.67±1.48Aa	165.00±5.00Ba
SM	CK	8.07±0.08Aa	70.58±0.30Ba	78.02±11.96Bb	326.67±7.64Bb
	N1	8.02±0.01Aa	67.62±0.30Bb	92.31±10.43Ba	330.00±15.00Bb
	N2	8.03±0.05Aa	72.56±1.22Ba	94.56±0.20Ba	367.50±3.54Aa
M	CK	8.04±0.08Aa	45.51±1.11Cb	38.23±3.16Cc	363.33±5.77Aa
	N1	8.06±0.12Aa	54.29±1.10Ca	62.68±3.88Cb	357.50±17.68Aa
	N2	8.02±0.01Aa	52.77±0.38Ca	73.90±0.44Ca	358.33±12.58Aa

注:表中数据为平均数±标准差;S、SM、M 分别为沼泽,沼泽草甸,草甸;同列不同大写字母表示不同区域同一施氮浓度在 5%水平差异显著;不同小写字母表示同一区域不同施氮浓度在 5%水平差异显著。下同。

2.2 氮添加对全磷和速效磷含量的影响

由图 1 可知,SM 区土壤全磷和速效磷含量均显著高于 S 和 M 区,且 S 区含量最低。SM 区全磷、速效磷含量分别为 1.24~1.35 g/kg,77.41~79.63 mg/kg。M 区全磷、速效磷含量分别为 1.07~1.20 g/kg,

67.62~68.38 mg/kg。S 区全磷、速效磷含量分别为 0.83~0.90 g/kg,55.76~56.14 mg/kg。氮添加对 3 种湿地类型土壤全磷和速效磷含量均无显著影响。由此可知,不同湿地类型土壤全磷和速效磷含量有着显著差异,但是氮添加对全磷和速效磷含量无显著影响。



注:图柱上方不同大写字母表示不同区域同一施氮浓度在 5%水平差异显著;不同小写字母表示同一区域不同施氮浓度处理在 5%水平差异显著。下同。

图 1 氮添加对高寒湿地土壤全磷和速效磷含量的影响

2.3 氮添加对土壤各形态无机磷的影响

由表 2 可知,氮添加对 Ca₈—P、Al—P、O—P 有显著影响,不同湿地类型间各无机磷形态均有显著差异,而氮添加与湿地类型的交互作用对 Al—P、Fe—P、O—P 和总无机磷有显著影响。M 区土壤总无机磷含量最高,SM 区次之,S 区最低,氮添加显著增加了 SM 区土壤总无机磷含量,对 S 和 M 区无显著影响(P>0.05)。且 S 区中总无机磷含量占全磷 46.17%~47.69%,SM 区中占 37.93%~42.45%,M 区中占 49.02%~52.61%。

具体分析各无机磷形态的变化发现,SM 区土壤 Ca₂—P 含量最高,其次是 S 区,M 区最低,与 CK 相比,N2 显著降低了 S 区 Ca₂—P 含量(降低 10.31%),但是氮添加对 SM 和 M 区 Ca₂—P 无显著影响。SM 和 M 区土壤 Ca₈—P 含量较高,与 CK 相比,N2 处理显著降低了 S 区和 SM 区 Ca₈—P 含量(分别降低

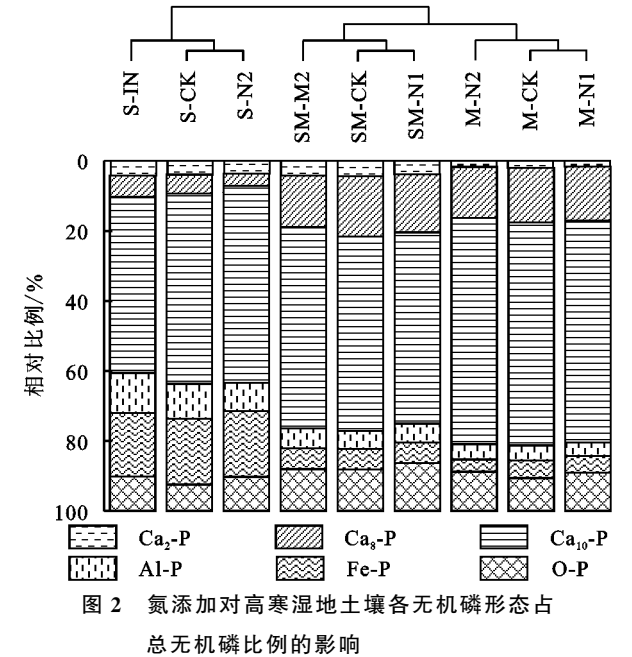
9.36%和 3.81%),氮添加对 M 区 Ca₈—P 含量无显著影响。M 区土壤 Ca₁₀—P 含量最高,SM 区次之,S 区最低,氮添加对 3 种湿地类型 Ca₁₀—P 含量均无显著影响。S 区土壤 Al—P 含量显著高于 SM 和 M 区,与 CK 相比,N1 处理显著增加了 S 区 Al—P 含量(增加了 9.92%),N2 处理又显著降低 21.49%,氮添加显著增加了 SM 区土壤 Al—P 含量(增加 14.61%~17.35%),但是对 M 区无显著影响。S 区 Fe—P 含量也显著高于 SM 和 M 区,与 CK 相比,N1 处理显著降低了 S 区 Fe—P 含量(降低 7.41%),N2 处理显著降低了 M 区 Fe—P 含量(降低 28.81%),氮添加对 SM 区 Fe—P 含量无显著影响。SM 区 O—P 含量最高,M 区次之,S 区最低,与 CK 相比,N1 显著增加了 SM 区土壤 O—P 含量(增加了 25.79%),氮添加显著增加了 S 和 M 区 O—P 含量(增加了 21.83%~25.93%)。

表 2 氮添加对高寒湿地土壤无机磷形态的影响 单位:mg/kg

研究区域	处理	Ca ₂ —P	Ca ₈ —P	Ca ₁₀ —P	Al—P	Fe—P	O—P	总无机磷
S	CK	15.88±1.64Ba	22.28±1.47Ba	221.96±7.50Ca	40.98±1.79Ab	76.55±3.54Aa	30.76±0.68Cb	408.41±11.70Ca
	N1	16.43±0.47Ba	23.93±2.27Ba	196.89±10.21Ca	45.04±1.17Aa	70.88±1.42Ab	38.51±3.95Ca	391.68±7.72Ca
	N2	14.25±1.42Bb	14.04±1.08Cb	223.78±6.35Ca	32.17±2.44Ac	74.89±3.64Aa	38.74±3.77Ba	397.87±8.71Ca
SM	CK	21.07±0.95Aa	83.04±3.89Ab	269.13±44.96Ba	24.72±1.35Bb	28.11±1.64Ba	57.43±0.68Ab	483.50±40.71Bb
	N1	19.70±1.70Aa	87.75±2.83Aa	287.36±3.23Ba	28.33±1.03Ba	30.71±1.78Ba	72.24±4.4Aa	526.11±2.60Ba
	N2	21.61±0.82Aa	75.27±2.67Bc	296.48±1.42Ba	29.01±1.03Ba	30.95±1.78Ba	61.30±3.95Ab	514.62±2.54Ba
M	CK	10.97±1.42Ca	86.57±1.08Aab	355.27±9.33Aa	24.27±0.39Bab	27.88±1.78Ba	52.19±3.95Bb	557.15±10.38Aa
	N1	9.61±1.25Ca	90.11±3.56Aa	368.95±5.04Aa	22.69±1.79Cb	27.64±1.23Ba	63.58±0.68Ba	582.57±1.05Aa
	N2	9.61±0.95Ca	83.28±1.78Ab	370.31±9.31Aa	25.17±0.39Ca	19.85±0.71Cb	64.26±1.18Aa	572.48±10.54Aa
方差	氮添加	1.177	35.618 **	2.094	12.008 **	2.514	32.985 **	2.883
分析	湿地类型	168.452 **	2007.621 **	189.111 **	293.017 **	1405.032 **	220.128 **	281.733 **
F 值	氮×湿地类型	2.218	1.440	1.665	31.534 **	8.980 **	3.936 *	3.060 *

注:*表示 P<0.05; **表示 P<0.01。下同。

由图 2 可知,3 种湿地类型间各无机磷所占比例有所差异,但是氮添加对各无机磷所占比例的影响较小。由聚类分析可知,SM 和 M 区无机磷的组成相似,而与 S 区有着明显的差异。整体来看,Ca₁₀—P 所占无机磷比例最高(50.27%~64.69%),处优势地位。其次是 S 区的 Fe—P(18.10%~18.82%)和 SM、M 区的 Ca₈—P(14.55%~17.17%)。O—P 在 3 种湿地类型内占 7.53%~13.73%。其余所占比例较小(1.97%~11.50%)。



2.4 氮添加影响土壤磷的相关因子分析

使用 RDA 对土壤性质与各磷形态含量之间进行排序。由图 3 可知,总体而言,2 个维度(RDA1 与 RDA2)共同解释了土壤磷形态变化的 92.42%,揭示了土壤因子对土壤无机磷形态的重要影响。土壤磷形态对氮添加的响应不明显,但是 3 种湿地类型之间差异显著。RDA 分析发现,土壤 SOC 和 AN 与 AP、Ca₂—P、Al—P 呈正相关关系,与 Ca₁₀—P 呈负相关关系。土壤 pH 和 AK 与 Ca₈—P、O—P 呈正相关关系,与 Fe—P 呈负相关关系。由表 3 蒙特卡洛置换检验可知,各土壤因子(pH、SOC、AN、AK)与不同磷形态之间均存在极显著相关($P=0.001$)。

3 讨论

磷素是植物生长中主要的限制性营养元素之一,尽管关于土壤磷素在各种陆地生态系统上分布特征的研究已有报道,但是对高寒湿地土壤磷素含量及其形态并没有充分的了解。本研究高寒湿地全磷含量为 0.83~1.35 g/kg。在闽江口芦苇湿地、交错带湿地和短叶荇芒湿地土壤上的研究^[11]发现,土壤全磷

平均含量分别为 656.6,775.5,721.9 mg/kg。本研究土壤全磷含量较高的原因可能是,本研究区气温低使得土壤微生物活性降低,从而导致土壤中的磷矿化速率低,植物吸收量少,磷素逐渐积累^[12]。由各无机磷形态所占比例可知,土壤总无机磷平均占全磷的 46%,土壤中无机磷主要以 Ca—P 形态存在。而 Ca—P 中以 Ca₁₀—P 为主,占无机磷 50.27%~64.69%。在扎龙湿地的研究^[13]发现,土壤中磷素也主要以无机磷形态存在,平均占全磷含量的 56%,略高于本研究结果。本研究中,不同湿地类型土壤水分的差异使得 SM 区土壤全磷和速效磷含量较高,土壤水分可参与土壤中磷素的转化,SM 区处于季节性积水区,适宜的水分含量可促进植物生长,利于土壤中磷素的积累,而 M 区处于临时积水区,土壤较干燥有利于有机磷的矿化,故无机磷含量较高^[14]。不同湿地类型土壤 pH、有机碳、碱解氮和速效钾含量的差异,可归因于土壤水分含量和植被的差异。S 区常年处于淹水状态,土壤处于厌氧环境,植物凋落物很难被矿化分解,常年积累进一步腐殖化后形成弱酸性的腐殖质,导致土壤 pH 较低^[15]。而随着 S—SM—M 区的变化,土壤有机碳含量显著降低,可归因土壤水分的差异,土壤水分充足则透气性差,有机碳不易矿化分解,随着土壤水分含量的减少,土壤有机碳矿化速率提高^[16]。土壤水分含量直接影响着土壤养分的运输、扩散和有效性,也通过植物生长和微生物活性改变土壤养分的有效性^[17]。

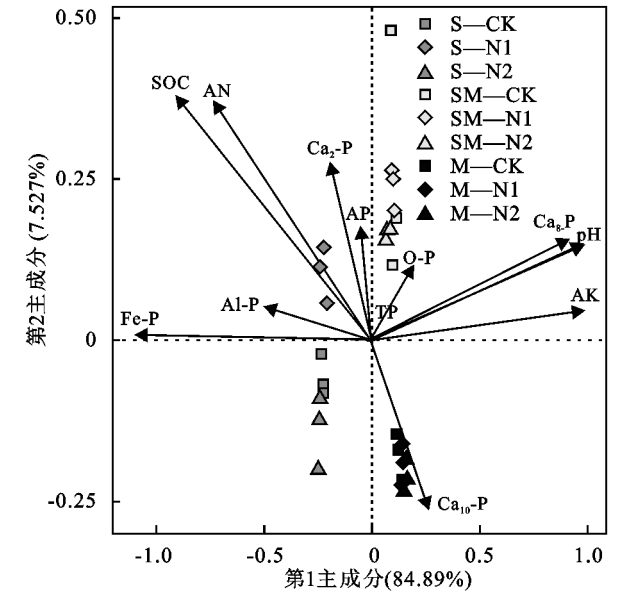


图 3 氮添加下高寒湿地土壤各磷形态与土壤因子之间的冗余分析

有机氮的添加可改变土壤原有氮循环,一方面氮添加可通过改变土壤理化性质来改变土壤磷循环,同

时氮添加可能会使土壤氮限制转为磷,导致土壤氮磷比失调^[18];另一方面,土壤氮、磷素之间可通过植物生长和微生物群落来相互影响,所以施用有机氮也可显著改变土壤磷素含量和形态。有研究^[7]发现,施氮对土壤全磷无显著影响,但是对土壤无机磷形态有着显著的影响,本研究结果与此一致。本研究中,有机氮的添加对土壤全磷和速效磷含量无显著影响,但不同程度的影响了土壤中各形态无机磷的含量。有研究^[19]发现,施氮显著降低 Al—P、Fe—P、Ca₂—P 和 Ca₁₀—P 含量,显著增加了 O—P 含量,但是对各无机磷组分比例变化的影响较小,本研究结果与此相似。但是本研究中氮添加对 Ca₁₀—P 无显著影响,可能是由于氮添加刺激了植物的生长,植物首先利用 Ca₂—P、Ca₈—P 和 Fe—P 容易吸收的磷形态,而对于植物难以吸收的 Ca₁₀—P,氮添加对其含量无显著影响^[20]。在不同湿地类型中,土壤无机磷组分对氮添加的响应并不一致。氮添加显著降低了 S 区土壤 Ca₂—P、Ca₈—P、Fe—P 的含量,但是增加了 O—P 含量。在 SM 区中,氮添加降低了 Ca₈—P 含量,增加了 Al—P、O—P 含量。而在 M 区中,氮添加降低了 Fe—P 含量,增加了 O—P 含量,这与湿地土壤性质和植被类型的差异有关^[18]。氮添加下土壤有机碳含量的增加归因于植物生存力的提高和凋落物数量的增加,速效氮和速效钾的增加是由于氮添加提高了土壤净氮的矿化速率,刺激了土壤解钾菌活性。

表 3 蒙特卡洛置换检验

指标	RDA1	RDA2	<i>r</i> ²	<i>P</i>
pH	0.994	0.110	0.978	0.001
SOC	−0.954	0.301	0.920	0.001
AN	−0.935	0.355	0.639	0.001
AK	0.999	0.033	0.964	0.001

注:表中 RDA1 与 RDA2 数据为土壤因子与排序轴夹角的余弦值,表示土壤因子与排序轴的相关性;*r*²表示土壤因子对物种分布的决定系数,*r*²越小,表示该因子对物种分布影响越小;*P* 表示相关性的显著性检验。

本研究 RDA 分析证实,土壤各无机磷形态主要与土壤 pH、有机碳、碱解氮、速效钾相关。已有研究^[21-22]认为,土壤化学性质可显著影响土壤磷素,土壤中磷素的吸附—解析过程随着土壤 pH 的变化而变化,而土壤有机碳本身具有吸附作用,可以从土壤中吸附一定的磷素。土壤氮、磷、钾之间存在着密切的关系,影响着其间的协同吸收和运输。

前人^[23]在石灰性土壤的研究发现,Ca₂—P 生物有效性最高,而 O—P 和 Ca₁₀—P 生物有效性最低,

Ca₈—P、Al—P、Fe—P 生物有效性介于二者之间。由此可知,虽然本研究氮添加对土壤全磷和速效磷含量无显著影响,但是降低了土壤中植物易利用无机磷的含量,增加了难利用无机磷的含量,从而降低了土壤的供磷潜力。有研究^[24]发现,氮添加易使土壤中可溶性磷向非活性磷酸盐迁移而难以利用,本研究结果与此一致。可能与植物和微生物对磷素的吸收利用有关,施氮可改变植物对磷的吸收,也可通过改变土壤微生物活性影响土壤中无机磷的转化^[18]。

4 结论

(1)高寒湿地 3 种湿地类型土壤全磷、总无机磷分别为 0.83~1.35 g/kg,391.68~582.57 mg/kg(平均占全磷的 45.67%)。土壤无机磷中主要以 Ca—P 形态存在,而 Ca—P 中又以 Ca₁₀—P 为主,占总无机磷含量的 50.27%~64.69%。

(2)氮添加显著影响了 3 种湿地类型土壤无机磷形态。总体上,氮添加降低了土壤中易被利用无机磷含量,主要通过增加土壤难被利用 O—P 含量(较 CK 增加 21.83%~25.94%),使土壤供磷潜力降低。

(3)土壤 pH、有机碳、碱解氮和速效钾是影响高寒湿地土壤无机磷形态转化的重要因子。

参考文献:

[1] 顾益初,蒋柏藩.石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J].土壤,1990(2):101-102,110.

[2] 孙宇,彭天驰,李顺,等.模拟氮沉降对湿性常绿阔叶次生林土壤碳氮组分和酶活性的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):235-243,250.

[3] Dong L L, Berg B, Sun T, et al. Response of fine root decomposition to different forms of N deposition in a temperate grassland [J].Soil Biology and Biochemistry, 2020,147:e107845.

[4] Margalef O, Sardans J, Fernández M M, et al. Global patterns of phosphatase activity in natural soils [J].Scientific Reports,2017,7(1):e1337.

[5] Chen H, Chen M L, Li D J, et al. Responses of soil phosphorus availability to nitrogen addition in a legume and a non-legume plantation [J].Geoderma,2018,322:12-18.

[6] 刘津,李春越,邢亚薇,等.长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(1):157-164.

[7] Wang R, Creamer C A, Jiang Z, et al. The effects of a 9-year nitrogen and water addition on soil aggregate phosphorus and sulfur availability in a semi-arid grassland [J].Ecological Indicators,2016,61:806-814.

[8] Wang R Z, Liu H, Sardans J, et al. Interacting effects

- of urea and water addition on soil mineral-bound phosphorus dynamics in semi-arid grasslands with different land-use history [J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 7(2): 946-962.
- [9] Liu S Y, Zhu X, Li D, et al. Soil aggregate and intra-aggregate carbon fractions associated with vegetation succession in an alpine wetland of Northwest China [J]. *Catena*, 2019, 181: 104-107.
- [10] Li K H, Gong Y M, Song W, et al. Responses of CH_4 , CO_2 and N_2O fluxes to increasing nitrogen deposition in alpine grassland of the Tianshan Mountains [J]. *Chemosphere*, 2012, 88(1): 140-143.
- [11] 张鹏飞, 孙志高, 陈冰冰, 等. 闽江口芦苇与短叶茳芏空间扩展对湿地土壤磷赋存形态的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7553-7566.
- [12] 胡保安, 贾宏涛, 朱新萍, 等. 水位对巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地土壤呼吸的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 175-179.
- [13] 贾晓丹, 臧淑英, 苏丹, 等. 扎龙湿地表层沉积物中磷形态的分布特征[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(5): 195-199.
- [14] 夏丽丹, 曹升, 张虹, 等. 不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(5): 1101-1111.
- [15] 张晓曦, 刘增文, 朱博超, 等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 1779-1787.
- [16] Ma M J, Zhou X H, Ma Z, et al. Composition of the soil seed bank and vegetation changes after wetland drying and soil salinization on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 18-24.
- [17] Cui Y X, Wang X, Zhang X C, et al. Soil moisture mediates microbial carbon and phosphorus metabolism during vegetation succession in a semiarid region [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 147: e107814.
- [18] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [19] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1459-1472.
- [20] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 663-670.
- [21] 高思佳, 王昌辉, 裴元生. pH 对活化前后废弃铁铝泥吸附不同种磷动力学的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(9): 3263-3269.
- [22] 王光火, 朱祖祥. 红壤及红壤性水稻土对磷的吸附—解吸特性比较[J]. *浙江农业大学学报*, 1987, 13(2): 129-136.
- [23] 郭智芬, 涂书新, 李晓华, 等. 石灰性土壤不同形态无机磷对作物磷营养的贡献[J]. *中国农业科学*, 1997, 30(1): 27-33.
- [24] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 等. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.