

滇中富磷区与贫磷区云南松群落差异与土壤磷素研究

成祥^{1,2}, 付登高^{1,2}, 何高迅^{1,2}, 张雅静^{1,2},
禹明慧^{1,2}, 王越^{1,2}, 刘嫦娥^{1,2}, 段昌群^{1,2}

(1. 云南大学生态与环境学院, 昆明 650000; 2. 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650000)

摘要: 以同在滇中地区磷素差异较大的富磷区与贫磷区的云南松林群落及其土壤为研究对象, 采用 Sui 修正后的 Hedley 磷素分级, 研究了土壤磷素的有效磷特征和土壤其他养分因子, 分析了 2 类云南松群落的结构及其差异。结果表明, 富磷区土壤全磷含量显著高于贫磷区, 虽然两地活性磷 (H_2O-P_i 、 $NaHCO_3-P_i$ 和 $NaHCO_3-P_o$) 含量都低于 10%, 但富磷区活性磷含量显著高于贫磷区, 贫磷区有机磷含量高于无机磷含量, 富磷区却相反; 富磷区其他土壤养分如全氮、有机碳含量也显著高于贫磷区。富磷区云南松群落林木密度、Shannon-wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数均高于贫磷区云南松群落, 而平均株高、平均胸径、冠幅低于贫磷区云南松群落。讨论认为, 在贫磷区云南松与富磷区云南松群落的生长发育与营养策略有关, 在磷素匮乏的地区, 植物群落为了维持正常生长而进行紧密磷素循环, 植物和微生物主要利用的磷素来自有机磷的矿化与溶解, 并最大限度地减少生物地球化学循环的磷损失; 但在磷素极其充沛的地区植物和微生物群落更加倾向将磷素从土壤矿石转移到生物地球化学循环中, 对于当地植物和微生物来说, 紧密的磷素回收就显得无关紧要。两地云南松群落结构的显著差异与地表磷素含量关系密切, 富磷区因土壤磷含量丰富, 并且引起其他营养资源丰富, 从而能够维持更多种类的植物, 同时相应地降低云南松在群落的生态优势; 相应地贫磷区磷素成为限制因素, 并且其他营养资源也相对短缺, 从而不能支持更高水平的植物多样性, 云南松因具有较强竞争力而生态优势更高。

关键词: 富磷区; 土壤有效磷; 土壤养分; 云南松群落; 群落结构; 生物多样性

中图分类号: S718.51⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0285-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.039

Differences of *Pinus yunnanensis* Community and Soil Phosphorus Between Phosphorus-rich and Phosphorus-poor Areas of Central Yunnan

CHENG Xiang^{1,2}, FU Denggao^{1,2}, HE Gaoxun^{1,2}, ZHANG Yajing^{1,2},
YU Minghui^{1,2}, WANG Yue^{1,2}, LIU Chang'e^{1,2}, DUAN Changqun^{1,2}

(1. School of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650000; 2. Key Laboratory of Plateau Mountain Ecology and Degraded Environment Restoration of Yunnan Province, Kunming 650000)

Abstract: In this study, *Pinus yunnanensis* communities and their soils in the two places (phosphorus-rich area and phosphorus-poor area) with large differences in phosphorus content in Central Yunnan were taken as the research objects. The Hedley phosphorus classification revised by Sui was used to study the available phosphorus characteristics of soil phosphorus and other soil nutrient factors, and the structure and differences of two types of *P. yunnanensis* communities were analyzed. The results showed that the total phosphorus content in the phosphorus-rich area was significantly higher than that in the phosphorus-poor area. Although the contents of active phosphorus (H_2O-P_i , $NaHCO_3-P_i$, and $NaHCO_3-P_o$) were lower than 10% in both areas, the active phosphorus content in the phosphorus-rich area was significantly higher than that in the phosphorus-poor area. In the phosphorus-poor area, the content of organic phosphorus was higher than that of inorganic phosphorus, but it was the opposite in the phosphorus-rich area. The contents of other soil nutrients such as total nitrogen and organic carbon in the phosphorus-rich area were also

收稿日期: 2021-06-24

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2002208); 云南省重点研发计划项目 (2019BC001)

第一作者: 成祥 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物恢复生态学。E-mail: cx_ecology@163.com

通信作者: 段昌群 (1966—), 男, 教授, 主要从事恢复生态学与生态工程领域研究。E-mail: chqduan@ynu.edu.cn

significantly higher than those in the phosphorus-poor area. The forest density, Shannon-wiener index, Simpson index and Pielou index of *P. yunnanensis* community in the phosphorus-rich area were all higher than those in the phosphorus-poor area, while the average plant height, average DBH and crown width were all lower than those in the phosphorus-poor area. The growth and development of *P. yunnanensis* communities in phosphorus-poor areas and phosphorus-rich areas were related to nutrition strategies. In phosphorus-deficient areas, plant communities carried out a tight phosphorus cycle to maintain normal growth. Phosphorus mainly used by plants and microorganisms came from the mineralization and dissolution of organic phosphorus, and the phosphorus loss was minimized in the biogeochemical cycle. However, in areas where phosphorus was extremely abundant, plant and microbial communities were more inclined to transfer phosphorus from soil ores to the biogeochemical phosphorus cycle. For local plants and microbes, tight phosphorus recovery was irrelevant. The significant difference in the community structure of *P. yunnanensis* between the two places was closely related to the phosphorus content on the ground. Phosphorus-rich areas were rich in soil phosphorus and other nutrient resources, which was able to maintain more kinds of plants and correspondingly reduce the ecological advantages of *P. yunnanensis* in the communities. Accordingly, phosphorus had become a limiting factor in phosphorus-poor areas, and other nutrient resources were also relatively short, which could not support a higher level of plant diversity. *P. yunnanensis* had a higher ecological advantage because of its strong competitiveness.

Keywords: phosphorus rich area; soil available phosphorus; soil nutrients; *Pinus yunnanensis* community; community structure; biodiversity

气候、土壤、地形等非生物因素和植物的生长策略与竞争等生物因素,以及空间相对位置共同决定植物群落的空间分布和共存^[1]。但是在局域环境下,土壤是影响植物群落结构的重要因素。土壤养分是决定植物生长的重要因素^[2],可以直接影响植物群落的结构、生产力及其稳定性。其中磷是生命系统的重要组成成分,其在生态系统的迁移转化是生态系统结构和功能的决定性因素之一^[3]。然而随着人类活动的加剧以及在农业生产中磷肥的过量使用造成生态系统磷素失衡,对森林生态系统的养分循环造成严重的危害^[4]。目前有迹象表明,森林生态系统正在逐渐丧失有效磷的回收能力,其原因是氮沉降造成过量的氮输入和全球气候变化引起的^[5]。陆地生态系统的磷素主要来源不是生物作用,而是矿物岩石的缓慢风化作用,并且伴随着在地质时代尺度上不断风化耗尽,在土壤发育过程中丢失,逐渐变成生物生产力的限制性养分元素^[6]。因此,在植物群落相同的情况下,探讨不同土壤磷素条件对群落结构的影响,能够更加准确地解释不同形态磷素对群落结构变化驱动机制,也对揭示植被演替规律具有重要意义。

本研究采用空间替代时间的方法,选取柴河小流域内的富磷区为研究对象。柴河小流域位于滇池流域南部,是我国著名的磷矿基地,采样区分布多条磷矿带,在山体自上而下 1/3~2/3 磷矿处有多处早年的采矿面。随着人类发展愈演愈烈,滇池流域土壤大

量的磷素从陆地进入滇池水体,加剧滇池富营养化程度,对流域生态环境构成严重威胁。贫磷区位于长江上游的金沙江流域,是我国南方水土保持和生态恢复的关键区域,特别是 20 世纪 50 年代大面的地带性植被遭破坏殆尽,该地区山地土壤质量退化很严重。土壤全磷含量远低于全国平均水平,通过对两地云南松群落土壤采用 Sui 修正后的 Hedley 磷素分级,研究两地土壤各形态磷素含量的差异,对两地云南松群落的结构差异进行分析,为以后相关区域功能性植被构建、功能评估及相关区域生态恢复措施的制定具有重要的指导和借鉴意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

滇中地区为季风气候区,干旱少雨,干湿季分明,半湿润常绿阔叶林成为区域的典型植被或气候顶级^[7]。20 世纪 50 年代滇中地区的地带性植被遭到破坏殆尽,20 世纪 60 年代末进行飞机播种形成的人工林,其云南松树龄均在 40~50 年。研究^[8-10]表明,具有相似气候类型及植被类型的滇池柴河流域与滇中飒马场流域两地,其土壤磷素含量相差巨大,前者土壤磷素含量高达 7.31 g/kg(以平均全磷计),远高于全国平均水平的 1.46 g/kg^[11],后者其土壤磷素水平仅为 0.609 g/kg,强烈的土壤 P 素背景差异为本试验提供极好的试验平台,本研究中对两试验区土壤主

要化学性质进行测定,并参考阎凯等^[9]富磷区的划分方法,依据区域土壤磷平均水平 1.4 g/kg 设定基准线,将平均土壤磷含量低于 0.70 g/kg 的飒马场区域定为贫磷区,同时将平均土壤磷含量高于 2.1 g/kg 的柴河区域定为富磷区。

飒马场贫磷区地处中亚热带西部云南省牟定县境内(25°24′—25°25′N, 101°28′—101°29′E),海拔 1 950~2 015 m,干湿季分明(降雨主要集中在 5—10 月,年均降雨量 850 mm),土壤以紫色土为主,亚热带半湿润季风气候。主要植物物种为云南松(*Pinus yunnanensis*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides*)、槲栎(*Quercus aliena*)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus*)、史密斯桉(*Eucalyptus smith*)。

柴河富磷区地处云南省晋宁县滇池流域柴河子流域内(24°36′—24°37′N, 102°41′—102°42′E),海拔 1 936~2 025 m,干湿两季分明(降雨主要集中在 5—10 月,年均降水量 925.4 mm),土壤类型为山地黄红壤、棕红壤,亚热带半湿润季风气候。主要植物物种为云南松(*Pinus yunnanensis*)、史密斯桉(*Eucalyptus smith*)等,是滇池流域富磷区的主要集中分布区。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查和土壤采样 群落样方调查参考方精云等^[12]的研究方法。于 2018 年 7—8 月,在贫磷区云南松林设置 10 m×40 m 样方 3 个;富磷区云南松群落由于分布较为破碎化,物种数相对较少,呈镶嵌结构散步,固在调查过程中各设置 10 m×10 m 样方各 3 个,调查其群落特征,在样方中进行每木检尺,记录树高、胸径、冠幅、盖度等,同时记录样地的地理位置、海拔等。在研究区域内选取云南松群落进行土壤样品采集,共设置 3 个采样样点,土层深度为 0—10, 10—20, 20—40 cm,每层随机采样 3 份土壤混合,作为该采样点土壤的代表性样品。

1.2.2 土壤样品分析 采用 Sui 等^[13]修正 Hedley 的土壤磷素分级法,过 100 目筛的 0.5 g 风干土壤样品,依次加入去离子水、0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 溶液、0.1 mol/L 的 NaOH 溶液、1 mol/L 的 HCl(D.HCl)、浓 HCl(C.HCl)提取出土壤稳定性由弱到强的各级无机磷和有机磷(图 1),即水提取态磷(H₂O—P_i)、碳酸氢钠提取态磷(NaHCO₃—P_i 和 NaHCO₃—P_o)、氢氧化钠提取态磷(NaOH—P_i 和 NaOH—P_o)、稀盐酸提取态磷(D.HCl—P_i)、浓盐酸提取态磷(C.HCl—P_i 和 C.HCl—P_o)、最后残渣经 H₂SO₄加 H₂O₂高温消解测定残留磷(Residual—P)。分级方法中的无机磷不消解直接对浸提液采用钼蓝比色测

定,而有机磷含量则需先消解测定浸提液的总磷,再减去相对应的无机磷含量后求得。土壤全磷采用硫酸—高氯酸消解钼蓝比色法测定;土壤有机碳含量等于土壤有机质含量/1.725,土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定。

在 Sui 磷素分级方法的 9 种磷形态中, H₂O—P_i 是植物吸收最有效的磷素形态^[14]。NaHCO₃—P_i 主要吸附土壤颗粒表面活性较强的磷, NaHCO₃—P_o 因具有易溶解矿化的特征,可以补充有效磷素。H₂O—P_i、NaHCO₃—P_i 和 NaHCO₃—P_o 是活性磷,即短时间能被植物吸收利用的有效形态的磷。NaOH—P_i 则是由化学作用吸附在铁铝氧化物表面的无机磷构成,通过解吸附可以被植物吸收利用。NaOH—P_o 由吸附在铁铝氧化物上的腐殖酸组成,化学性质较为稳定。NaOH—P_i 和 NaOH—P_o 是中等活性磷。D.HCl—P_i 是土壤母质中钙结合态无机磷,受母质影响较大,化学性质较为稳定。C.HCl—P_i 是铁铝氧化物及磷灰石紧密结合的缓效态无机磷,极难被植物短时间利用, C.HCl—P_o 主要有化学性质非常稳定的有机磷构成,与钙结合紧密,较难利用。Residual—P 是指较稳定的闭蓄态磷,一般很难转化为有效态磷素。D.HCl—P_i、C.HCl—P_i 和 C.HCl—P_o 是低活性磷^[15-17]。

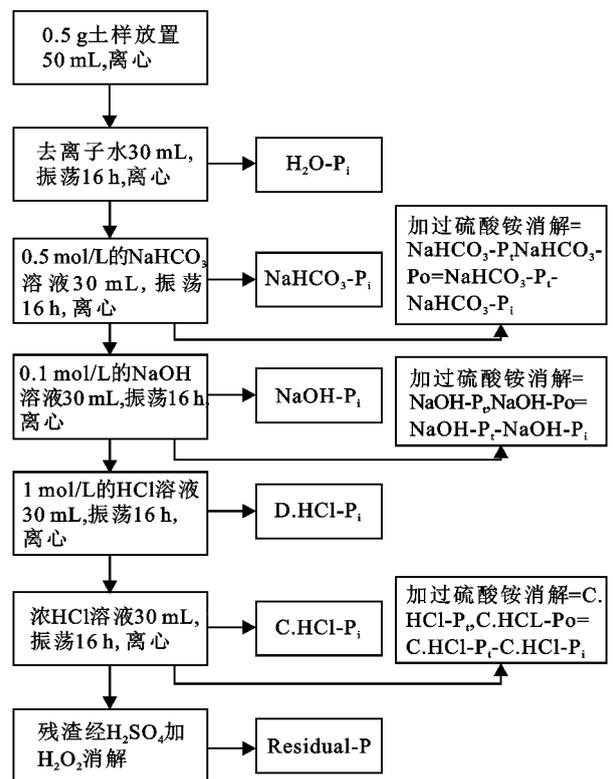


图 1 Sui 等修正 Hedley 的土壤磷素分级提取流程

1.2.3 物种多样性指数的计算 分别计算乔木、灌木及草本植物的重要值^[18]。其计算公式分别为:

乔木的重要值=相对密度+相对优势度+相对高度

灌木和草本植物重要值=相对高度+相对盖度

辛普森多样性指数(D): $D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2$

香农-威纳指数(H): $H=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Pielou 指数: $E=\frac{H}{\ln S}$

式中: S 为物种数目; P_i 为第 i 种植物的相对重要值。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 对数据进行统计分

析。采用单因素(One-way ANOVA)进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),利用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 群落结构及物种多样性

由表 1 可知,贫磷区云南松群落特征中平均株高、平均胸径、冠幅、盖度高于富磷区云南松群落,但是富磷区林木密度高于贫磷区林木密度。富磷区云南松群落多样性 Shannon-wiener 指数、Simpson 指数以及物种均匀度 Pielou 指数高于贫磷区云南松群落。

表 1 研究样地云南松群落结构特征

样地	林木密度/ (株·m ⁻²)	平均 株高/m	平均 胸径/cm	冠幅/ (m ² ·株 ⁻¹)	盖度	香农- 威纳指数	辛普森 指数	皮诺 指数
I	0.26±0.10	8.18±1.46	11.85±2.72	7.02±1.91	0.57±0.13	1.15±0.25	0.56±0.13	0.61±0.13
II	0.50±0.23	5.50±3.22	6.87±2.90	3.15±1.49	0.43±0.19	2.86±0.39	0.94±0.03	0.92±0.24

注:表中数据为平均值±标准差;I 为贫磷区的云南松林;II 为富磷区的云南松林;表中数据为平均值±标准差($n=3$)。

2.2 土壤基本理化特征

由表 2 可知,对富磷区与贫磷区云南松群落土层深度分别是 0—10,10—20,20—40 cm 的土壤全磷进行比较,贫磷区土壤 3 个深度的土壤全磷差异不显著,富磷区 10—20 cm 与 0—10,20—40 cm 层土壤全磷呈显著差异。相比较而言,富磷区土壤全磷含量(8.01~8.93 g/kg)显著大于贫磷区(0.21~0.22 g/kg)。

在贫磷区和富磷区随着土层深度增加,全氮显著降低,富磷区全氮显著高于贫磷区。

两地有机质含量随着土层深度增加,有机质含量显著降低,富磷区有机质含量显著高于贫磷区。两地土壤含水量随土层深度增加而下降,富磷区含水量显著高于贫磷区含水量。富磷区与贫磷区土壤 pH 相差不大,在 4.44~4.95。

表 2 两地云南松群落土壤基本理化特征

研究 地区	土层 深度/cm	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	总有/ (g·kg ⁻¹)	含水量/%	pH
贫磷区	0—10	0.22±0.01c	0.70±0.013d	10.10±0.16cd	17.02±2.14b	4.71±0.01a
	10—20	0.21±0.01c	0.52±0.027e	7.02±0.95de	15.63±1.63b	4.86±0.24a
	20—40	0.21±0.01c	0.44±0.003f	4.41±0.38e	14.19±2.48b	4.95±0.47a
富磷区	0—10	8.13±0.06b	2.35±0.002a	37.51±2.38a	34.10±4.26a	4.44±0.29a
	10—20	8.93±0.14a	1.31±0.012b	20.68±1.42b	31.09±4.65a	4.5±0.09a
	20—40	8.01±0.14b	0.91±0.003c	11.99±2.40c	28.64±2.93a	4.53±0.08a

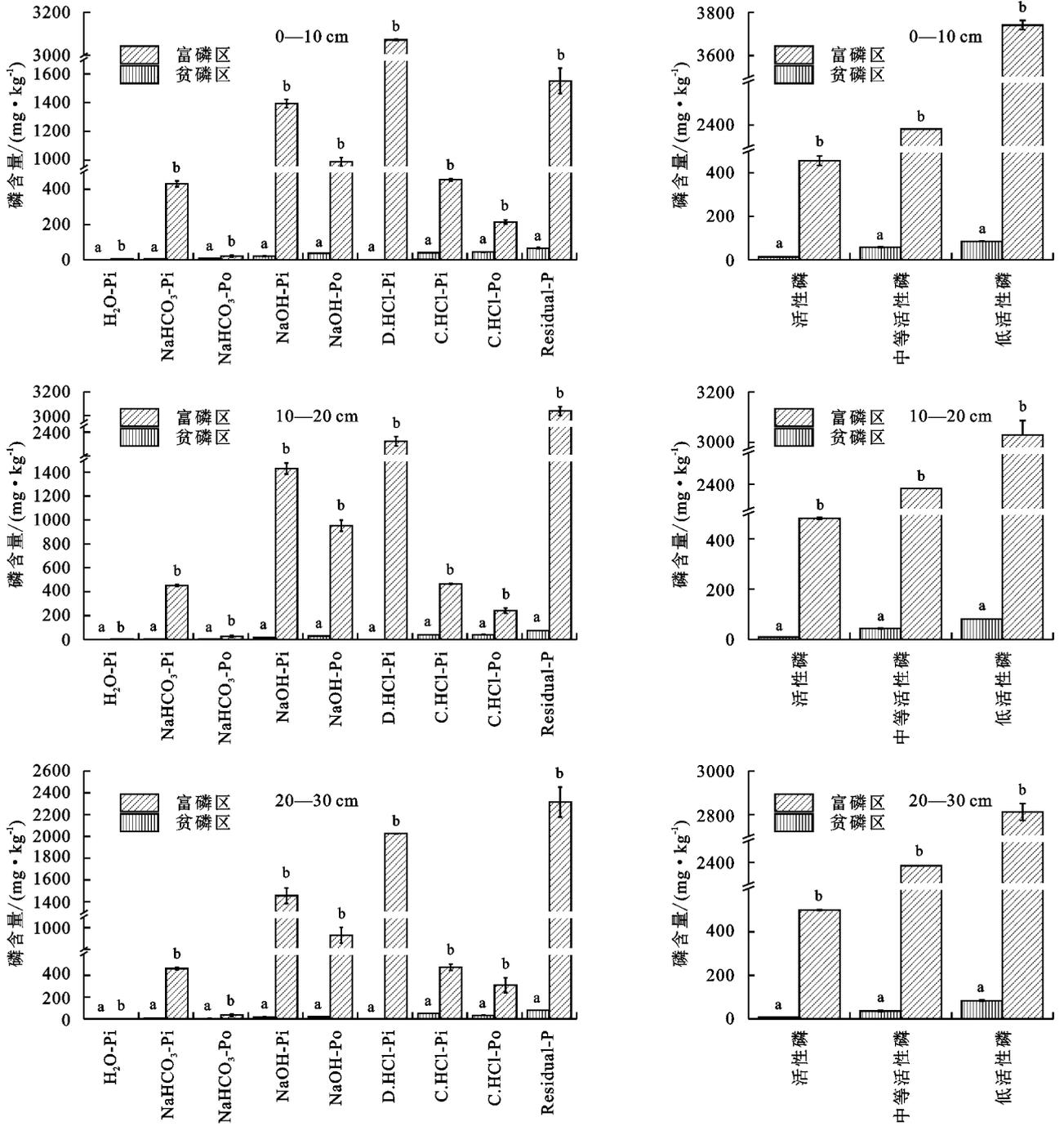
注:表中数据为平均值±标准差($n=3$);同列不同小写字母表示不同土层间在 0.05 水平上存在显著差异。

2.3 两地土壤磷形态及含量差异

由图 2 可知,富磷区与贫磷区不同土壤磷素形态含量差异显著,且富磷区各种磷组分含量显著高于贫磷区。其中两地 H₂O—P_i 含量较其他磷组分最低,贫磷含量在 0.11~0.18 mg/kg,富磷区(1.59~4.98 mg/kg)。贫磷区 Residual—P 含量最高(66.25~79.17 mg/kg),而富磷区 D.HCl—P_i 含量最高(2 025~3 071.63 mg/kg)。

两地都存在低活性磷含量>中等活性磷含量>活性磷含量。富磷区活性磷(H₂O—P_i、NaHCO₃—P_i和 NaHCO₃—P_o)的含量(456.63~500.04 mg/kg)显著高于贫磷区的含量(7.91~13.91 mg/kg),其中贫磷区 NaHCO₃—P_o含量高于 NaHCO₃—P_i含量,然而富磷区却相反。贫磷区活性磷随着土层深度增加而减少,然而富磷

区却相反;富磷区中等活性磷(NaOH—P_i和 NaOH—P_o)的含量(2 382.60~2 385 mg/kg)显著高于贫磷区的含量(36.30~57.90 mg/kg),其中贫磷区 NaOH—P_o含量高于 NaOH—P_i含量,然而富磷区却相反。贫磷区中等活性磷随着土层深度增加而减少,然而富磷区却相反;富磷区低等活性磷(D.HCl—P_i、C.HCl—P_i和 C.HCl—P_o)的含量(2 812~3 740.63 mg/kg)显著高于贫磷区的含量(81.43~85.36 mg/kg),其中贫磷区 C.HCl—P_o含量高于 D.HCl—P_i与 C.HCl—P_i含量之和,但是贫磷区土层 20—30 cm 却出现相反现象。然而富磷区依然是无机磷含量高于有机磷。富磷区低活性磷随着土层深度增加而减少,然而贫磷区低活性磷最小值出现在土层 10—20 cm。



注:不同小写字母表示相同磷形态不同地点间差异显著($P < 0.05$)。

图 2 两地不同土层下不同磷形态含量

2.4 磷库的构成

由图 3 可知, H_2O-P_i 和 $NaHCO_3-P$ ($NaHCO_3-P_i$ 和 $NaHCO_3-P_o$) 所构成的活性磷^[14], 贫磷区活性磷占磷素总量的 4.74%~8.02%, 富磷区活性磷占磷素总量的 5.39%~6.24%, 富磷区和贫磷区活性磷所占比例小, 但是富磷区总磷含量较大, 所以其含量远高于贫磷区活性磷。 $NaOH-P$ ($NaOH-P_i$ 和 $NaOH-P_o$) 常被认为是中等活性的磷^[19], 贫磷区中等活性的磷占总磷总量的 21.76%~33.41%, 富磷区中等活性的磷占总磷总量的 26.67%~29.76%, 是土壤重要的磷库储备, 而贫磷区 $NaOH-P$ 的组成

中以 $NaOH-P_o$ 为主, 占其总量的 54.27%~64.50%, 而富磷区 $NaOH-P$ 的组成中以 $NaOH-P_i$ 为主, 占其总量的 58.50%~60.95%。 $HCl-P$ ($D.HCl-P_i$ 和 $C.HCl-P$) 常被认为是低活性磷^[15], 富磷区 $D.HCl-P_i$ 所占比例为 25.27%~37.78%, 而贫磷区所占比例较低仅为 0.27%~0.28%, 然而贫磷区 $C.HCl-P$ ($C.HCl-P_i$ 和 $C.HCl-P_o$) 所占比例最高, 占磷素总磷的 46.74%~50.96%, 而富磷区 $C.HCl-P$ 占磷素总磷的 7.9%~9.82%, 所占比例较低。 $Residual-P$ 指较稳定的闭蓄态磷, 一般很难转化为有效态的磷素, 很难被植物利用^[19], 贫磷区 $Residual-P$

P 占磷素总磷的 38.23%~47.45%, 仅低于 HCl—P, 富磷区 Residual—P 占磷素总磷的 19.08%~34.58%。在贫磷区总有机磷 ($\text{NaHCO}_3\text{—P}_o$ 、 NaOH—P_o 和 C.HCl—P_o) 占总磷的 33.46%~51.97%, 高于总无机磷 ($\text{H}_2\text{O—P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{—P}_i$ 、 NaOH—P_i 、 D.HCl—P_i 和 C.HCl—P) 所占比例 34.83%~44.26%, 然而在富磷区总有机磷占总磷的 13.66%~15.93%, 小于总无机磷所占比例 (52.31%~65.86%)。

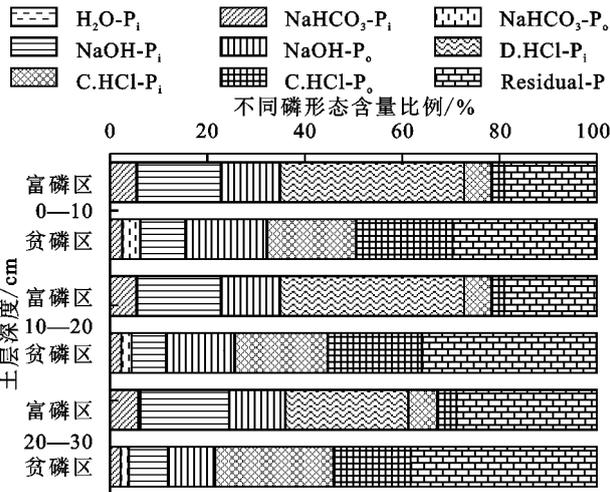


图 3 不同土层下土壤各形态 P 占 TP 比重

3 讨论

3.1 不同土壤磷素条件下云南松土壤磷素赋存特征

磷素有众多的形态, $\text{H}_2\text{O—P}_i$ 是土壤中最容易被植物和微生物利用的磷素形态, 但其含量较低, 两地含量仅占 TP 含量的 1% 以下, 与大多数文献报道^[16-17,20] 中类似。 $\text{H}_2\text{O—P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{—P}_i$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{—P}_o$ 被认为是活性磷, 即短时间里容易被植物和微生物吸收利用的有效磷^[21-22], 因其受植物、旱雨季影响较大, 所以呈现较大的波动^[23]。 贫磷区土壤活性磷形态以 $\text{NaHCO}_3\text{—P}_o$ 为主, 这与其他高原山地的研究^[16,24-25] 结果类似。 高原山地特殊的自然地理环境也有利用 $\text{NaHCO}_3\text{—P}_o$ 积累, 其土壤营养物质以生物小循环为主, SOM 和 N 积累量大且分解较为缓慢, C/N 和 C/P_{organic} 相对较高, SOM 矿化速率相对较慢; 但富磷区以 $\text{NaHCO}_3\text{—P}_i$ 为主, 生物活动造成有机磷的积累相对地处磷灰石为主的磷矿附近的富磷区而言显得无足轻重^[23]。 NaOH—P_o 是土壤有机磷重要的组成部分, NaOH—P_o 与 SOM 之间呈显著的相关关系 ($R^2 = 0.907$, $P = 0.013$), 表明土壤有机质是 NaOH—P_o 的重要来源。

富磷区与贫磷区相比, 虽然总磷相差巨大, 但贫磷区有机磷比例大于无机磷, 这是由于在较大时间尺度上, 大部分磷随着土壤发育过程丢失, 剩下的磷逐渐转化为有机结合形式。 有研究^[26-29] 表明, 随着成土

过程中的生物活动, 土壤有机物质不断积累, 有机磷含量增加, 森林的更新后凋落物的归还均使土壤有机磷含量上升。 贫磷区位于滇中地区地处长江上游的金沙江流域, 曾经由于人类不科学的开发利用导致当地植被遭到破坏殆尽, 后来进行人工修复, 如飞机播种等, 是我国南方水土保持和生态恢复的关键区域, 随着植被恢复, 土壤有机质含量增加, 土壤有机磷含量提高。 富磷区位于云南省的昆阳磷矿附近, 是我国四大磷矿之一, 其地区土壤磷含量背景值较高, 矿区以胶磷矿为主, 矿物组成一般含有 39.5% 的 P_2O_5 , 造成当地土壤无机磷含量较高。

3.2 土壤特征对云南松群落结构的影响

土壤作为植物生长发育的重要的物质基础, 是决定植物结构的主要因素^[30], 其中土壤养分 TN 与 TOC 与植被群落存在极为密切的关系, 是影响群落的重要因子, 这与已有的研究^[31-32] 结果类似。 在贫磷区中有机磷含量高于无机磷, 而富磷区却相反, 这种差异对当地植被的发展有巨大的影响。 其中原因与森林的营养策略有关, Lang 等^[33] 在 2016 年提出的森林磷素营养策略中表明, 在磷素匮乏的地区, 植物群落为了维持正常生长而进行紧密磷素循环, 植物和微生物主要利用的磷素来自有机磷的矿化与溶解, 并最大限度地减少生物地球化学循环的磷损失, 这一系列机制被称为磷素回收策略; 但在磷素极其充沛的地区植物和微生物群落更加倾向将磷素从土壤矿石转移到生物地球化学磷循环中, 对于当地植物和微生物来说, 紧密的磷素回收则显得无关紧要, 这一系列机制被称为磷素获取策略。 森林生态系统是植物与土壤相互作用而形成的, 土壤磷既影响着植物群落, 植物群落反过又会改善土壤性质和改变土壤磷库的构成^[33]。 两地植物群落结构特征的形成与磷素营养策略有密切关系^[34-35], 土壤有效养分是影响植物生长和植物群落结构的关键因素, 在富磷区植物可以更加容易吸收到活性磷成分, 而在贫磷区, 由于没有充足的活性磷成分, 只能利用有机磷的矿化与溶解形成的活性磷成分。

植物个体和植物种间对土壤有限资源的竞争, 是影响植物群落物种组成和群落动态的关键因素^[34-36]。 云南松群落在富磷区多样性高于贫磷区, 在于富磷区资源更加丰富, 能够维持更多种类的植物, 同时相应地降低了云南松在群落的生物优势, 而贫磷区因资源限制, 不能支持更高水平的植物多样性, 云南松因具有较强竞争力从而生物优势更高。 生物优势是指生境中资源被少数物种优先占有的程度。 形成生物优势的內因是种间的相互作用或竞争, 外因是环境条件。 最典型的生物优势现象可在温带顶级森林群落中看到, 那里总是以少数几个物种在群落中占有绝对

优势的地位。在群落或生态系统受到外界轻度干扰时,或在次生演替时,群落的物种多种多样程度变高,而趋向于顶级时,优势物种逐渐在竞争中占据资源,排挤其他物种^[37]。但在亚马逊森林和其他许多热带雨林中,由于资源充沛,物种多而分布较均匀,无少数物种占优势的现象。

4 结论

(1)富磷区土壤全磷含量显著高于贫磷区,虽然两地活性磷(H_2O-P_i 、 $NaHCO_3-P_i$ 和 $NaHCO_3-P_o$)含量都低于10%,但富磷区活性磷含量显著高于贫磷区;贫磷区有机磷含量高于无机磷含量,而富磷区却相反。富磷区其他土壤养分如全氮、有机碳含量也显著高于贫磷区。

(2)富磷区云南松群落林木密度、Shannon-wiener指数、Simpson指数、Pielou指数均高于贫磷区云南松群落,而平均株高、平均胸径、冠幅低于贫磷区云南松群落。

(3)两地云南松群落结构的显著差异与土壤磷素含量关系密切,富磷区因土壤磷含量丰富,并且引起其他营养资源丰富,从而能够维持更多种类的植物,同时相应地降低了云南松在群落的生态优势;相应地贫磷区磷素成为限制因素,并且其他营养资源也相对短缺,从而不能支持更高水平的植物多样性,云南松因具有较强竞争力从而生态优势更高。

参考文献:

[1] 田立新,吴初平,杨少宗,等.浙江杭州午潮山亚热带常绿阔叶林群落结构和物种组成[J].应用生态学报,2020,31(6):1909-1915.

[2] Bennett J A, Klironomos J. Mechanisms of plant-soil feedback: Interactions among biotic and abiotic drivers[J]. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 91-96.

[3] 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.

[4] Elser J, Bennett E. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 29-31.

[5] Jonard M, Fürst A, Verstraeten A, et al. Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 418-430.

[6] Ruttenger K C. The global phosphorus cycle[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 10(2): 499-558.

[7] 吴征镒,朱彦丞.云南植被[M].北京:科学出版社,1987.

[8] 段昌群,何峰,刘嫦娥,等.基于生态系统健康视角下的云南高原湖泊水环境问题的诊断与解决理念[J].中国工程科学,2010,12(6):62-66,72.

[9] 阎凯,付登高,何峰,等.滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J].植物生态学报,2011,35(4):353-361.

[10] 付登高,何峰,郭震,等.滇池流域富磷区退化山地马桑一

蔗茅植物群落的生态修复效能评价[J].植物生态学报,2013,37(4):326-334.

[11] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2):377-385.

[12] 方精云,王襄平,沈泽昊,等.植物群落清查的主要内容和方法和技术规范[J].生物多样性,2009,17(6):533-548.

[13] Sui Y, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a Mollisol amended with biosolids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1174-1180.

[14] Rose T J, Hardiputra B, Rengel Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 159-170.

[15] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions, sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 37-47.

[16] 张林,吴彦,吴宁,等.林线附近主要植被类型下土壤非生长季磷素形态[J].生态学报,2010,30(13):3457-3464.

[17] 张鑫,谷会岩,陈祥伟.择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷形态及有效性的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):441-448.

[18] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,1995,15(3):268-277.

[19] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Journal of the Soil Science Society of America*, 1982, 46(5): 970-976.

[20] Cassagne N, Remaury M, Gauquelin T, et al. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees, France)[J]. *Geoderma*, 2000, 95(1/2): 161-172.

[21] Frossard E, Stewart J W B, StArnaud R J. Distribution and mobility of phosphorus in grassland and forest soils of Saskatchewan[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, 69(2): 401-416.

[22] 张林,吴宁,吴彦,等.土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J].应用生态学报,2009,20(7):1775-1782.

[23] 张龙.滇中富磷区与非富磷区主要植物群落优势种对土壤磷素形态的影响研究[D].昆明:云南大学,2014.

[24] Shiels A B, Sanford R L. Soil nutrient differences between two krummholz-form tree species and adjacent alpine tundra[J]. *Geoderma*, 2001, 102(3/4): 205-217.

[25] Litaor M I, Seastedt T R, Walker M D, et al. The biogeochemistry of phosphorus across an alpine topographic/snow gradient[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 49-61.

[26] Cross A F, Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to

- the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. *Geoderma*, 1995, 64(3/4): 197-214.
- [27] Frizano J, Johnson A H, Vann D R, et al. Soil phosphorus fractionation during forest development on landslide Scars in the Luquillo Mountains, Puerto Rico[J]. *Biotropica*, 2002, 34(1): 17-26.
- [28] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(5): 83-96.
- [29] 王娜, 朱小叶, 方晰, 等. 中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 218-225, 234.
- [30] 宋创业, 郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 40-49.
- [31] 薛鸥, 魏天兴, 刘飞, 等. 公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(1): 91-100.
- [32] 江源, 章异平, 杨艳刚, 等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被—土壤系统耦合的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 837-846.
- [33] Lang F, Bauhus J, Frossard E, et al. Phosphorus in forest ecosystems: New insights from an ecosystem nutrition perspective[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(2): 129-135.
- [34] Tilman D. Nitrogen-limited growth in plants from different successional stages[J]. *Ecology*, 1986, 67(2): 555-563.
- [35] Bedford B L, Walbridge M K, Lldous A. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands[J]. *Ecology*, 1999, 80(7): 2151-2169.
- [36] Belsky A. Population and community processes in a mosaic grassland in the Serengeti, Tanzania[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74(3): 841-856.
- [37] 李振基, 陈小麟, 郑海雷. 生态学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2004.
- (上接第 284 页)
- [9] Scheer C, Wassmann R, Kienzler K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 290-301.
- [10] 郭晓旭, 杨恒山, 郜继承, 等. 作物浅埋滴灌技术研究进展[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(1): 80-84.
- [11] Lyamuremye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption[J]. *Soil Science*, 1996, 161(7): 426-435.
- [12] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [13] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 2004—2015 年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(7): 1105-1114.
- [14] 卢小宏, 黄晶, 史磊刚, 等. 北京市主要农作模式的碳效益分析[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 48-53.
- [15] 周涛, 王云鹏, 王芳, 等. 广东省农业氮足迹分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2430-2438.
- [16] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 281-296.
- [17] 李锐, 杨恒山, 郜继承, 等. 浅埋滴灌条件下优化施氮对春玉米田温室气体排放的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(6): 154-161.
- [18] 曹彪, 白云岗, 卢震林, 等. 寒旱区紫花苜蓿浅埋式滴灌灌溉制度试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(增刊 2): 60-62.
- [19] 梅园雪, 冯玉涛, 冯天骄, 等. 玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析[J]. *玉米科学*, 2018, 26(1): 98-102.
- [20] 黄坚雄, 陈源泉, 刘武仁, 等. 不同保护性耕作模式对农田的温室气体净排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2935-2942.
- [21] 杨恒山, 薛新伟, 张瑞富, 等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 69-77.
- [22] 王福祥, 肖开转, 姜身飞, 等. 干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制[J]. *科学通报*, 2019, 64(17): 1765-1779.
- [23] 刘战东, 张凯, 黄超, 等. 不同耕作和灌溉方式对玉米光合特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 213-220.
- [24] 刘涛, 吴漩, 郑子成, 等. 不同灌水频率条件下设施土壤水盐运移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(4): 622-631.
- [25] 郭树芳, 齐玉春, 罗小玲, 等. 滴灌对干旱区春小麦田土壤 CO₂、N₂O 排放及综合增温潜力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4): 792-798.
- [26] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 等. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化[J]. *作物学报*, 2013, 39(7): 1284-1292.
- [27] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3151-3158.
- [28] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 576-585.
- [29] 关红杰, 李久生, 栗岩峰. 干旱区滴灌均匀系数和灌水量对土壤水氮分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 121-128.