

DOI: 10.5846/stxb201912042630

王攀,余海龙,许艺馨,李春环,黄菊莹.宁夏燃煤电厂周边土壤、植物和微生物生态化学计量特征及其影响因素.生态学报,2021,41(16):6513-6524.

Wang P, Yu H L, Xu Y X, Li C H, Huang J Y. C:N:P ecological stoichiometry in soils, plants, microbes, and their influencing factors around the coal-fired power plants in Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6513-6524.

宁夏燃煤电厂周边土壤、植物和微生物生态化学计量特征及其影响因素

王攀^{1,2,3,4}, 余海龙⁴, 许艺馨⁴, 李春环⁴, 黄菊莹^{1,2,3,*}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

3 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

4 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

摘要: 大气酸沉降增加对陆地生态系统的影响已得到了广泛证实, 但有关酸沉降累积下工业排放源周边植被-土壤系统元素平衡特征及其影响机制的研究较少。燃煤电厂是主要的工业酸排放源之一。因此, 以宁东能源化工基地 3 个燃煤电厂为观测点, 研究了电厂周边土壤-植物叶片-微生物生态化学计量特征, 分析了叶片和微生物生物量生态化学计量特征与降水降尘 S、N 沉降量及土壤性质的关系。结果表明: 土壤和微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征变异系数较大, 叶片各指标的变异系数较小。与受人类活动影响较少的其他同类型区相比, 研究区具有较高的土壤有机 C 水平和 N、P 供给, 且 P 相对于 N 丰富。植物可能主要受 N 限制, 而微生物主要受 P 限制; 土壤及微生物元素间均存在极显著的线性关系 ($P < 0.001$)。叶片全 C 与全 N、全 P 均无显著的关系 ($P > 0.05$)。叶片全 N、全 P 和 N:P 具有高的内稳性。微生物生物量 N:P 内稳性较强, 但生物量 N 和 P 内稳性较弱, 对土壤环境的变化反应敏感; SO_4^{2-} 沉降有助于促进叶片对 P 的摄取和微生物对 C、N、P 的固持。少量 NO_3^- 沉降有利于叶片 N 摄取, 但持续增加的 NO_3^- 沉降可能会使土壤 P 受限性增强, 进而抑制叶片 P 摄取和微生物生物量积累。土壤酶活性、 Ca^{2+} 和含水量亦显著影响着植物和微生物元素生态化学计量关系 ($P < 0.05$)。因此, 今后还需结合多个电厂的土壤性质和植被状况, 从较长时间尺度上深入揭示酸沉降增加对工业排放源周边植被-土壤系统元素平衡特征的影响机制。

关键词: 大气氮硫沉降; 西北荒漠煤矿区; 元素内稳性; 元素限制; 工业氮硫排放源

C:N:P ecological stoichiometry in soils, plants, microbes, and their influencing factors around the coal-fired power plants in Ningxia

WANG Pan^{1,2,3,4}, YU Hailong⁴, XU Yixin⁴, LI Chunhuan⁴, HUANG Juying^{1,2,3,*}

1 College of Ecology and Environmental Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Breeding Base for State Key Lab. of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China

3 Key Lab. for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

4 College of Geography Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Recently, with the practice of emission control measure on air pollutant and the transformation of economic structure, atmospheric acid (mainly S and N) deposition shows a downward trend in most areas of China, but keeps increasing in the northwest region. The effects of increasing atmospheric acid deposition on terrestrial ecosystems have been widely confirmed. However, there are few studies on the elemental ecological stoichiometry and its influencing mechanisms

基金项目: 宁夏自然科学基金(2020AAC03050)

收稿日期: 2019-12-04; 修订日期: 2021-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: juyinghuang@163.com

in the plant-soil systems around industrial emission sources under accumulating acid deposition. Coal-fired power plant is one of the main industrial sources of acid emission. In this paper, C:N:P ecological stoichiometry in soils, leaves of common plants, and microbes were thus measured around three coal-fired power plants in Ningdong Energy and Chemical Industry Base. The relationships were analyzed between leaf C:N:P ecological stoichiometry and environmental factors (monthly mean deposition of S and N in precipitation and dustfall and soil properties) and also between microbial biomass C:N:P ecological stoichiometry and environmental factors. The results showed that, the variation coefficients were generally higher in soil and microbial biomass C:N:P ecological stoichiometry than those in leaves. The levels of soil organic C, total N, and total P in the study area were higher than those in the same type areas, and the supply of P was more abundant than that of N. Plants might be mainly limited by N, whereas microbes might be P-limited; significantly linear relationships were detected among the three elements in both soils and microbes ($P < 0.001$), whereas insignificant relationships were observed between C and N and also between C and P in leaves ($P > 0.05$). The homeostasis of total N, total P, and N:P were high in leaves. The homeostasis of biomass N:P was higher while those of N and P were lower in microbes, resulting in high sensitivities of microbes to environmental changes in soils; SO_4^{2-} deposition simulated leaf P uptake and microbial C, N, and P immobilization. Low amount of NO_3^- deposition was beneficial for leaf N absorption, whereas continually increased NO_3^- deposition might intensify P limitation and thus inhibited leaf P uptake and microbial biomass accumulation. Soil enzymatic activity, Ca^{2+} , and water content also significantly regulated the C:N:P ecological stoichiometry in leaves and microbes ($P < 0.05$). Therefore, it is necessary to deeply reveal the influencing mechanisms in plant-soil systems around industrial emission sources under accumulating acid deposition with the comprehensive consideration of the soil properties and plant conditions in more power plants on a longer time scale.

Key Words: atmospheric N and S deposition; desert coal-mining region in northwest China; elemental homeostasis; elemental limitation; industrial source of N and S emission

工业革命以来,人类活动产生了大量二氧化硫(SO_2)和氮氧化物(NO_x),导致大气酸沉降增加。长期酸沉降增加不但会引起土壤酸化,而且可能造成碳(C):氮(N):磷(P)失衡和P限制增加,导致生物多样性降低和生态系统退化^[1]。近年来,随着大气污染物控制措施的逐步推进和经济结构的全面转型,酸沉降在欧美等发达国家呈降低趋势,但在亚洲等发展中国家仍逐年增加^[2]。研究发现,自1990年以来全国硫(S)沉降下降,N沉降普遍上升^[3];然而,随着煤炭等行业的快速发展,西北地区S、N沉降均加快,且致酸物质由以S为主转变为以N为主^[4-5]。相关研究表明,尽管估测的宁夏N沉降量低于华南、西南、华北等高N沉降区域,但较低的N沉降临界负荷^[6]以及N沉降与S沉降的促进/拮抗作用^[7],使得区域S、N沉降状况同样值得重视。燃煤电厂是 SO_2 、 NO_x 等酸前体物的主要工业排放源。因此,在宁夏燃煤电厂周边研究S、N沉降效应,可为科学评估区域大气污染物限排措施的实施效果提供数据支撑。

植被-土壤系统C:N:P生态化学计量特征可指示系统C积累动态以及N、P限制格局^[8],调控着植物生长发育、微生物活动和凋落物分解等关键过程。因此,研究土壤、植物和微生物C:N:P平衡关系可为阐明全球变化的生态效应提供新思路。通常认为有机体C、N、P之间的比值相对稳定,在维持生态系统功能方面发挥着重要作用。例如,在一定的外界条件下,土壤中C和N的积累与消耗过程是相互耦合的,二者比值的时空变异性较小^[9];植物通过细胞成分或体内环境的自主调控,以保持元素组成相对稳定^[10];微生物则通过分泌胞外酶或调整生存策略等途径来适应底物养分条件的变化,从而维持自身恒定的元素比^[11]。然而,近年来随着酸沉降量的持续增加,土壤和植物C:N:P平衡关系趋于解耦^[12-13],并通过对植被群落组成的影响改变微生物元素平衡关系^[14],导致生态系统服务功能降低。目前,国内已有较多研究探讨了酸沉降增加下土壤、植物和微生物C:N:P平衡特征,但相关研究多为模拟N沉降试验,且多集中在酸性、中性和轻度碱性土壤,尚缺乏针对工业排放源周边S、N复合沉降下的研究,尤其是土壤呈中重度碱性的区域。

宁东能源化工基地(以下简称宁东基地)地处西北荒漠区,是我国能源金三角的重要组成部分^[15]。随着国家“西电东送”火电基地的建设,宁东基地吸引了大批煤电企业。虽然各燃煤电厂已实现了超低排放,但

其 SO_2 和 NO_x 排放对全国总排放率的贡献逐年增加,是区域空气 S、N 的主要来源^[15]。项目组前期的研究表明,宁东基地 SO_4^{2-} 沉降量与全国水平相当;无机 N 沉降量低于全国平均值,但高于西北地区平均水平^[16];同时,宁东基地分布着大面积的灰钙土,具有 pH 高和 CaCO_3 含量多等特点,土壤呈中度碱性。相对酸性土壤,碱性土壤较高的 pH 和碳酸盐含量使得其通常具有较强的酸缓冲性能^[17]。那么,较高的 S、N 沉降是否会导致该区域植物和微生物 P 限制增强?较高的 S、N 沉降累积下植物和微生物元素内稳性如何?当前 S、N 复合沉降下哪些环境因子能够解释植物-微生物 C:N:P 生态化学计量关系的变化等问题都值得深入分析。为此,本文以宁东基地三个燃煤电厂为研究区,探讨了电厂周围土壤、植物和微生物平衡特征及其驱动因素,研究结果将有助于促进荒漠煤矿区经济与生态的均衡发展。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

宁东基地是国家大型的煤炭生产基地,位于宁夏中东部,地处毛乌素沙地西南缘,具有降水少(<300 mm)、蒸发强以及沙尘天气多等气候特征。土壤类型以灰钙土、风沙土及少量盐碱土为主,具有 pH 高、有机质含量低、可溶性盐浓度高等特点。天然植被稀疏,多为草本、半灌木和灌木,且呈斑块状聚集^[16, 18]。

在宁东基地选择宁夏发电集团有限责任公司马莲台电厂(38.17° N, 106.57° E, 海拔 1258 m)、国网能源宁夏煤电有限公司鸳鸯湖电厂(38.06° N, 106.70° E, 海拔 1279.6 m)和华电宁夏灵武发电有限公司灵武电厂(38.17° N, 106.35° E, 海拔 1272.5 m)为监测点。其中,马莲台电厂机组规模为 2×330 MW,是宁东基地第一个开工建设投产的重大工程和大型企业。鸳鸯湖电厂一期机组规模为 2×660 MW,二期机组规模为 2×1100 MW,是西部地区和国神集团最大的电厂。灵武电厂一期机组规模为 2×600 MW,二期机组规模为 2×1000 MW,是宁夏“十一五”重点建设项目。灵武电厂地势低洼,相较马莲台和鸳鸯湖电厂具有较高的土壤含水量和电导率(表 1)。

表 1 电厂周围月平均 S、N 沉降量以及土壤性质

Table 1 Monthly mean deposition of S and N and soil indices in the studied power plants

指标 Index	马莲台电厂	鸳鸯湖电厂	灵武电厂
SO_4^{2-} 沉降量 SO_4^{2-} deposition/($\text{kg hm}^{-2} \text{月}^{-1}$)	2.69±0.12	2.06±0.09	2.78±0.13
NO_3^- 沉降量 NO_3^- deposition/($\text{kg hm}^{-2} \text{月}^{-1}$)	1.19±0.08	1.30±0.09	1.06±0.07
NH_4^+ 沉降量 NH_4^+ deposition/($\text{kg hm}^{-2} \text{月}^{-1}$)	0.25±0.02	0.21±0.01	0.23±0.01
无机 N 沉降量 Inorganic N deposition/($\text{kg hm}^{-2} \text{月}^{-1}$)	1.44±0.10	1.51±0.10	1.29±0.08
土壤含水量 Soil water content/%	7.94±0.27	4.12±0.71	15.76±1.04
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	1.43±0.05	1.48±0.03	1.34±0.04
土壤 pH Soil pH	8.93±0.07	9.13±0.03	8.73±0.13
土壤电导率 Soil electric conductivity/($\mu\text{s/cm}$)	477.94±248.21	76.16±6.82	2286.80±253.14
土壤 NO_3^- -N Soil NO_3^- -N/(mg/kg)	1.86±0.16	2.83±0.35	7.34±1.10
土壤 NH_4^+ -N Soil NH_4^+ -N/(mg/kg)	1.64±0.06	1.80±0.09	2.38±0.15
土壤速效 P Soil available P/(mg/kg)	1.18±0.15	0.91±0.09	7.80±1.08
土壤蔗糖酶活性 Soil invertase activity/($\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)	279.73±17.78	194.87±12.81	278.65±12.13
土壤脲酶活性 Soil urease activity/($\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)	19.49±1.06	16.47±0.96	25.22±2.53
土壤磷酸酶活性 Soil phosphatase activity/($\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$)	23.35±1.25	23.15±1.48	53.43±3.53
土壤 K^+ Soil K^+ /(mg/kg)	3.75±0.01	6.98±1.27	11.63±2.26
土壤 Ca^{2+} Soil Ca^{2+} /(g/kg)	4.32±1.48	0.94±0.17	2.36±0.55
土壤 Na^+ Soil Na^+ /(g/kg)	5.22±2.15	0.47±0.189	16.37±1.619
土壤 Mg^{2+} Soil Mg^{2+} /(g/kg)	11.68±1.99	4.13±0.59	50.96±8.68

表内 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和无机 N 沉降量引自王攀等^[16];所有数据为平均值±标准误差

1.2 野外取样方法

依据前期调研结果,本研究将取样点统一设在3个电厂围墙外东南方向(下风向)远离农田、牧场和道路等无人活动的扇形区域内,按照不同取样距离收集样品。每个取样距离上随机选取3个植被分布较为均匀的区域作为采样点,每个采样点面积约10 m×10 m^[16,18]。

样品收集时间为2018年8月上旬。在每个采样点用内径为5 cm的土钻随机取三钻0—20 cm表层土壤,混匀作为一个样品。取一部分土样装入铝盒中用于含水量的测定(105 ℃, 8 h),剩余部分土样装入封口袋中。同期,采用环刀法测定土壤容重。所有土样放入保温箱迅速带回实验室后,将封口袋内土样过2 mm筛并分为三部分:第一部分用于pH和电导率的直接测定;第二部分自然风干后用于有机C含量、全N含量、全P含量、速效P浓度和盐基离子浓度的测定;最后一部分4 ℃下冷藏,用于NH₄⁺-N浓度、NO₃⁻-N浓度、微生物生物量和酶活性的测定。同期,以每个监测点常见原生植物种为研究对象进行植物叶片的收集(表2)。为尽可能避免因植株年龄、大小和微生境等方面引起的取样误差,生长季开始前在每个采样点对所选植物种进行挂牌标记。每个采样点每个物种标记3株。每种植物收集30—100片健康绿叶,分装入信封后带回实验室,在烘箱中65 ℃下烘干48 h,研磨、粉碎过60目筛后,测定全C、全N和全P浓度。

此外,参照邢建伟等^[19]和《环境空气降尘标准》(GB/T 15265—1994)^[20],采用手动采样器结合替代面法收集了1—6月(受采样周期和技术手段限制,未能完整采集到全年沉降样品)每个采样点的降水降尘混合样品,具体收集方法见项目组前期研究^[16,18]。

表2 三个电厂取样距离和所选植物种

Table 2 The sampling distances and chosen plant species in the studied power plants

电厂 Power plant	取样距离/m Sampling distance	植物种 Plant species
马莲台电厂	100,300,500	臭蒿(<i>Artemisia hedinii</i>)、猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)、针茅(<i>Stipa capillata</i>)、甘草(<i>Glycyrrhiza uralensis</i>)、草木樨状黄芪(<i>Astragalus melilotoides</i>)、槐树(<i>Amorpha fruticosa</i>)
鸳鸯湖电厂	100,300,500,1000	猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)、猪毛蒿、看麦娘(<i>Alopecurus aequalis</i>)、甘草、草木樨状黄芪、披针叶黄华(<i>Thermopsis schischkinii</i>)
灵武电厂	100,300,500,1000,2000	臭蒿、芦苇(<i>Phragmites australi</i>)、白草(<i>Pennisetum centrasiacicum</i>)、针茅、草木樨状黄芪、沙枣(<i>Ziziphus jujube</i>)

1.3 室内测试分析

样品各项指标的测定方法如下:叶片全C、全N和全P分别采用重铬酸钾容量法-外加加热法、凯氏定N法和钼锑抗比色法;土壤有机C、全N和全P分别采用重铬酸钾容量法-外加加热法、凯氏定N法和HClO₄-H₂SO₄法。新鲜土样经1 mol/L KCl溶液浸提后,采用连续流动分析仪测定NO₃⁻-N和NH₄⁺-N。土壤速效P采用0.5 mol/L NaHCO₃法。土壤含水量和容重分别采用称重法和100 cm³环刀法。土壤电导率和pH分别采用梅特勒S230电导率仪法和S220多参数测试仪法。土壤K⁺和Na⁺采用火焰光度法。土壤Ca²⁺和Mg²⁺采用EDTA滴定法。土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性分别采用3,5-二硝基水杨酸、苯酚-次氯酸钠和磷酸苯二钠比色法;微生物生物量C、N和P分别采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提-碳分析仪器法、氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-流动注射氮分析仪器法以及氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-磷酸(Pi)测定-外加Pi矫正法;降水降尘月沉降量为项目组前期试验观测结果,具体的测定方法见王攀等^[16]和王攀^[18]。

1.4 统计方法

内稳性指数依据生态化学计量内稳性模型进行计算^[21]:

$$y = Cx^{1/H}$$

其中, y 为叶片/微生物生物量 N、P、N:P; 考虑到植物和微生物对土壤养分不同的吸收利用方式, 在计算叶

片内稳性时 x 分别对应土壤无机 N、速效 P 和二者比值, 在计算微生物内稳性时 x 分别对应土壤全 N、全 P 和 N:P^[22-23]; C 和 H 分别为拟合常数和内稳性指数。在 $P < 0.05$ 的条件下, $H > 4$, y 为稳态; $2 < H < 4$, y 为弱稳态; $1.33 < H < 2$, y 为弱敏感态; $H < 1.33$, y 为敏感态。在 $P > 0.05$ 的条件下, y 为绝对稳态^[24]。

在 Excel 2007 中计算土壤、植物叶片和微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征的变异系数(CV, 标准差与平均值之比)。使用 Sigmaplot 12.5 进行图的绘制。采用 R 3.4.3 中的 vegan 程序包分别对叶片和微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征与环境因子之间的关系进行冗余分析(RDA): 先通过 Log 或 Hellinger 转换使所有数据符合正态分布, 再以叶片和微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征为响应变量、以全部环境因子为解释变量(影响较小的环境因子通过解释变量前项选择剔除)进行 RDA。同时, 求得每个环境因子的条件效应。

2 结果与分析

2.1 电厂周围土壤、叶片和微生物生物量 C、N、P 及其比值的变化范围

土壤和微生物各指标相较植物叶片有较大变异系数(图 1 和图 2): 土壤有机 C、全 N、全 P、C:N、C:P 和 N:P 的变化范围分别为 1.14—11.88 g/kg、0.10—1.19 g/kg、0.39—0.80 g/kg、5.25—14.55、4.25—18.96 和 0.37—1.66; 微生物各指标的变化范围分别为 28.95—129.57 mg/kg、3.09—31.60 mg/kg、0.64—5.24 mg/kg、1.92—10.99、8.43—63.89 和 2.71—8.64; 叶片各指标的变化范围分别为 279.90—521.54 mg/g、11.40—51.10 mg/g、1.07—2.97 mg/g、8.53—40.36、100.02—438.66 和 6.30—27.42。总体而言, 土壤—叶片—微生物系统元素间比值的变异系数小于各元素含量的变异系数。

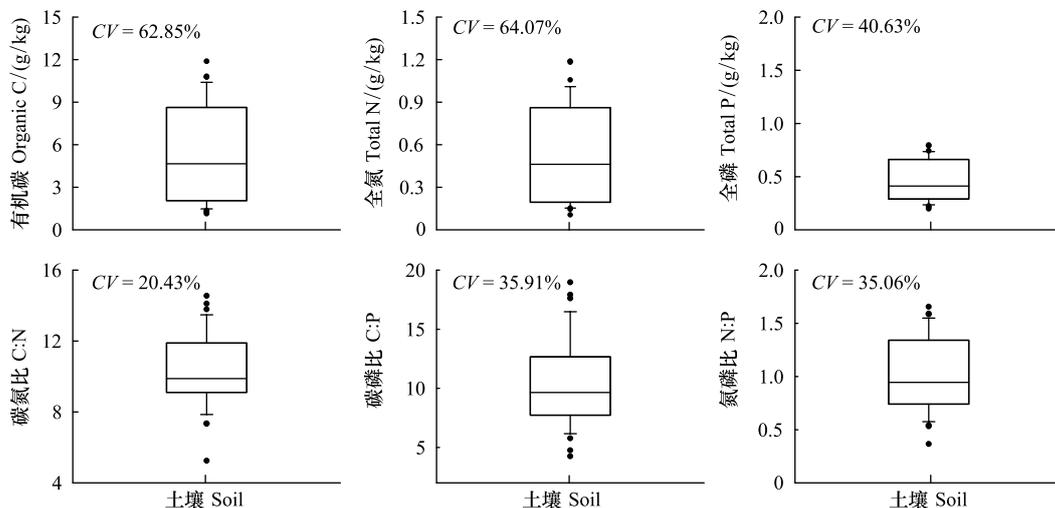


图 1 电厂周围土壤 C:N:P 生态化学计量特征

Fig.1 Soil C:N:P ecological stoichiometry around the studied power plants

CV: 变异系数 Coefficient of variation

2.2 电厂周围土壤、叶片和微生物 C、N、P 拟合关系

图 3 中, 叶片全 N 和全 P 均与全 C 无显著的线性关系($P > 0.05$), 全 N 和全 P 存在显著的线性关系($P < 0.001$); 土壤和微生物 3 个元素间均存在极显著的线性关系($P < 0.001$)。

2.3 电厂周围叶片和微生物生物量 N、P、N:P 内稳性

依据 Persson 等提出的内稳性判定阈值^[24], 叶片全 N 和微生物生物量 N:P 为绝对稳态; 叶片全 P 和 N:P 为稳态; 微生物生物量 P 为弱稳态; 微生物生物量 N 为弱敏感态(图 4)。

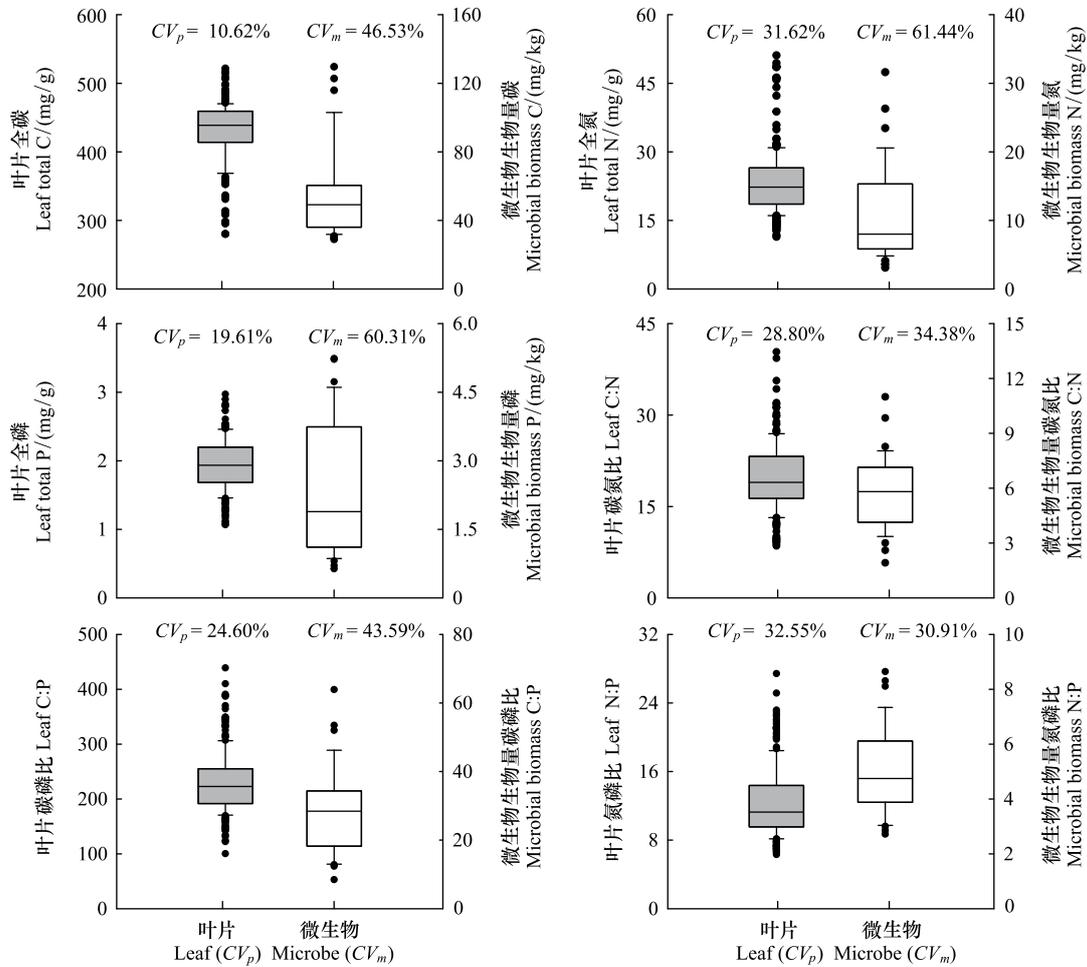


图2 电厂周围叶片和微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征

Fig.2 The C:N:P ecological stoichiometry in leaves and microbes around the studied power plants

2.4 叶片和微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征与环境因子的关系

对叶片 C:N:P 生态化学计量特征影响显著的环境因子依次为 SO₄²⁻ 沉降量、NO₃⁻ 沉降量、土壤蔗糖酶活性、无机 N 沉降量、土壤 Ca²⁺ 和土壤含水量(表 3)。SO₄²⁻ 沉降量、土壤蔗糖酶活性、土壤 Ca²⁺ 和土壤含水量与叶片 C:N 正相关, 与叶片全 N 及 N:P 负相关; NO₃⁻ 和无机 N 沉降量与叶片全 N、C:P 及 N:P 正相关, 与叶片全 C、全 P 及 C:P 负相关(图 5)。

表 3 叶片 C:N:P 生态化学计量特征与环境因子 RDA 中各因子的条件效应

Table 3 The conditional effects of environmental factors in RDA of C:N:P ecological stoichiometry in leaves explained by environmental factors

	AF	DSO ₄ ²⁻	DNO ₃ ⁻	IA	DTIN	Ca ²⁺	SW
F	5.231	33.072	21.243	11.352	7.173	5.953	5.785
R ²	0.861	0.287	0.184	0.110	0.006	0.015	0.025
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.006	0.006

AF: 所有因子 All factors; DSO₄²⁻: SO₄²⁻ 月沉降量 Monthly deposition of SO₄²⁻; DNO₃⁻: NO₃⁻ 月沉降量 Monthly deposition of NO₃⁻; DTIN: 无机 N 月沉降量 Monthly deposition of inorganic N; IA: 土壤蔗糖酶活性 Soil invertase activity; Ca²⁺: 土壤 Ca²⁺ Soil Ca²⁺; SW: 土壤含水量 Soil water content

对微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征影响显著的环境因子依次为 SO₄²⁻ 沉降量、无机 N 沉降量、NO₃⁻ 沉降量、土壤脲酶活性、土壤磷酸酶活性和土壤含水量(表 4)。其中, SO₄²⁻ 沉降量、土壤脲酶活性、土壤

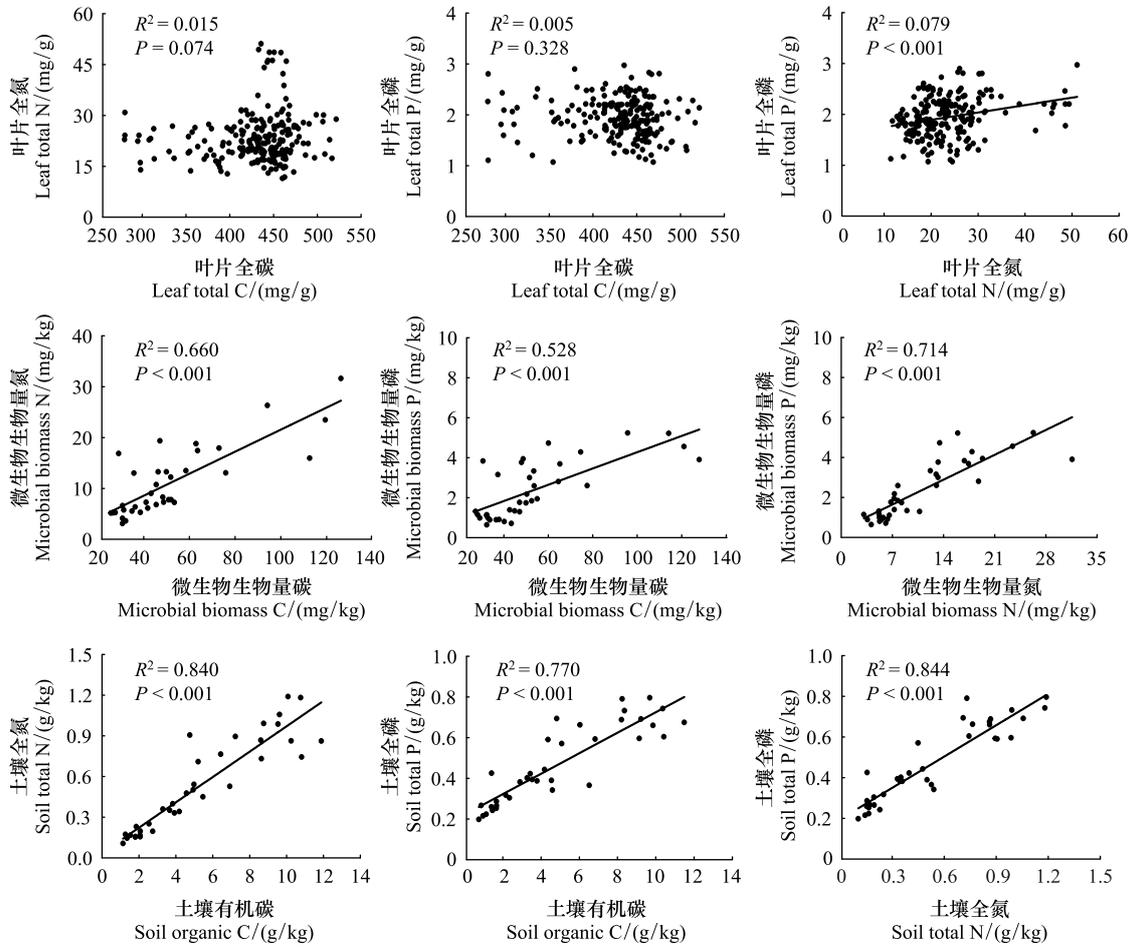


图3 电厂周围叶片、微生物和土壤 C、N、P 拟合关系

Fig.3 The relationships among C, N, P in leaves, microbes, and soils around the studied power plants

磷酸酶活性和土壤含水量与微生物生物量 C、N、P 正相关，与微生物生物量 C : N : P 负相关；无机 N 和 NO_3^- 沉降量与以上指标负相关(图 6)。

表 4 微生物生物量 C : N : P 生态化学计量特征与环境因子 RDA 中各因子的条件效应

Table 4 The conditional effects of environmental factors in RDA of C : N : P ecological stoichiometry in microbes explained by environmental factors

	AF	DSO_4^{2-}	DTIN	DNO_3^-	UA	PA	SW
<i>F</i>	10.012	86.972	39.497	14.599	13.614	10.171	3.961
R^2	0.922	0.422	0.073	0.002	0.199	0.087	0.052
<i>P</i>	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.043

3 讨论

3.1 电厂周围植被-土壤系统 C : N : P 生态化学计量特征的变化范围及受限性

研究表明，我国表层土壤平均有机 C 为 2047 mmol/kg、全 N 为 134 mmol/kg、全 P 为 25 mmol/kg^[25]。本研究对各指标进行了摩尔浓度转化，转化后的有机 C 为 844.65 mmol/kg、全 N 为 93.44 mmol/kg、全 P 为 18.92 mmol/kg，低于全国平均值，但高于其他受人为干扰较少的同气候类型区的观测值^[26-27]。此外，全国尺度上土壤 C : N 为 14.4 (摩尔比，下同)、C : P 为 13.6、N : P 为 9.3^[25]。本研究中，转换后的各指标分别为 11.16、

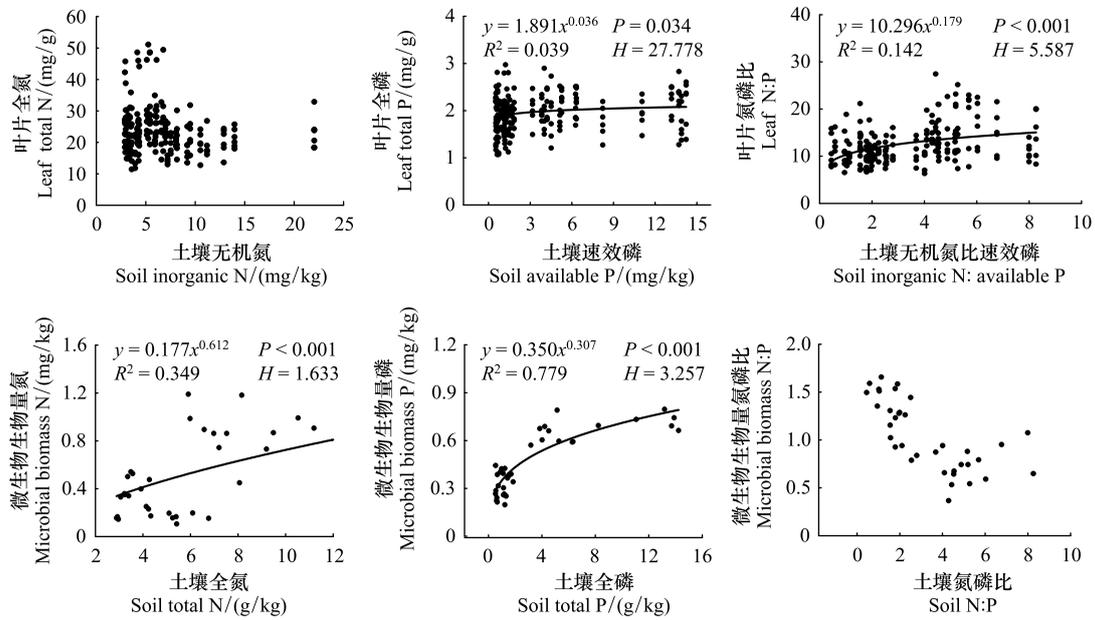


图4 电厂周围叶片和微生物生物量 N、P、N:P 内稳性

Fig.4 The homeostasis of N, P, and N:P in leaves and microbes around the studied power plants

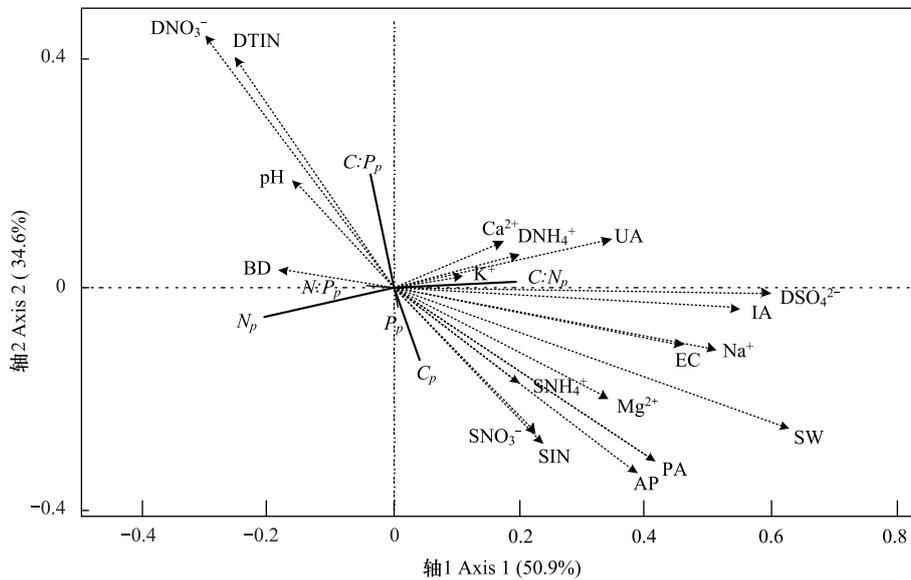


图5 叶片 C:N:P 生态化学计量特征与环境因子关系的 RDA

Fig.5 RDA of C:N:P ecological stoichiometry in leaves explained by environmental factors

C_p : 叶片全 C Leaf total C; N_p : 叶片全 N Leaf total N; P_p : 叶片全 P Leaf total P; $C:N_p$: 叶片 C:N Leaf C:N; $C:P_p$: 叶片 C:P Leaf C:P; $N:P_p$: 叶片 N:P Leaf N:P; DNH_4^+ : NH_4^+ 月沉降量 Monthly deposition of NH_4^+ ; SNH_4^+ : 土壤 NH_4^+ -N Soil NH_4^+ -N; SNO_3^- : 土壤 NO_3^- -N Soil NO_3^- -N; SIN: 土壤无机 N Soil inorganic N; AP: 土壤速效 P Soil available P; pH: 土壤 pH Soil pH; BD: 土壤容重 Soil bulk density; EC: 土壤电导率 Soil electric conductivity; K^+ : 土壤 K^+ Soil K^+ ; Na^+ : 土壤 Na^+ Soil Na^+ ; Mg^{2+} : 土壤 Mg^{2+} Soil Mg^{2+} ; UA: 土壤脲酶活性 Soil urease activity; PA: 土壤磷酸酶活性 Soil phosphatase activity

29.37 和 2.63, C:N 和 N:P 低于全国平均值。土壤 C:N 和 C:P 可指示底物质量, N:P 可指示 N 饱和状况^[8]。结合有机 C、全 N 和全 P 的供给状况, 以上结果意味着与自然条件下同类型区相比, 研究区土壤有较

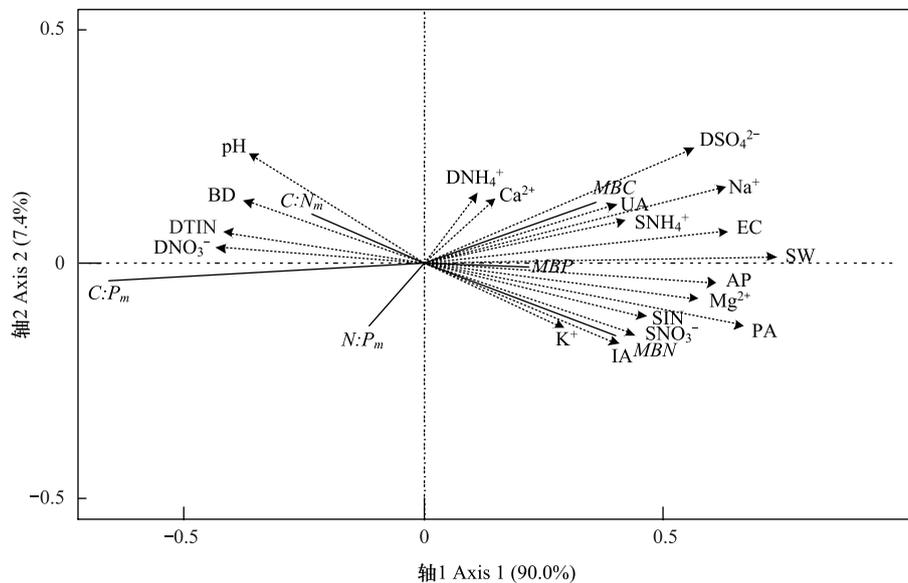


图 6 微生物生物量 C:N:P 生态化学计量特征与环境因子关系的 RDA

Fig.6 RDA of C:N:P ecological stoichiometry in microbes explained by environmental factors

MBC: 微生物生物量 C Soil microbial biomass C; MBN: 微生物生物量 N Soil microbial biomass N; MBP: 微生物生物量 P Soil microbial biomass P; C:N_m: 微生物生物量 C:N Soil microbial biomass C:N; C:P_m: 微生物生物量 C:P Soil microbial biomass C:P; N:P_m: 微生物生物量 N:P Soil microbial biomass N:P

高的有机 C 水平和 N、P 供给能力; 且即使研究区具有较高的 N 沉降量^[16], 其土壤 N 供给依然相对于 P 匮乏。此外, 较高的 C:N 也意味着微生物分解有机 N 的速度较快, 可为植物提供较多的无机 N。

本研究中, 叶片平均全 N 和全 P 分别为 23.41 mg/g 和 1.95 mg/g, 高于全球尺度和全国水平草本植物的观测值^[28-29], 但与内蒙古科尔沁沙地^[30]等类型地区的观测值相近, 反映了干旱半干旱环境下植物较强的 N 吸收能力^[31]和较高的土壤 P 供给能力^[32]。考虑到叶片对环境变化的敏感性, 较高的叶片 N、P 也间接地反映了研究区较高的 N 沉降量^[18]以及植物对 P 的协同吸收^[33]。叶片 C:N:P 生态化学计量比可以反映植物生长过程中的 N、P 受限状况。Koerselman 和 Meuleman 认为植物 N:P<14 时, 其生长主要受 N 限制; N:P>16 时, 主要为 P 限制^[34]。Güsewell 则认为该判断阈值分别为 N:P<10 和 N:P>20^[35]。本研究中, 平均叶片 C:N 为 19.86、C:P 为 230.46、N:P 为 12.33, 低于全球平均值^[28,36], 但接近沙地植物的观测结果^[30]。结合全 N 和全 P 的变化特点, 较低的叶片 C:N:P 意味着研究区植物可能主要受 N 的限制。

研究区微生物生物量 C 的变化范围为 28.95—129.57 mg/kg、生物量 N 为 3.09—31.60 mg/kg、生物量 P 为 0.64—5.24 mg/kg, 低于土壤肥力条件较好的我国草原区的报道值^[37-38]。土壤有机质是微生物生长的底物, 因此通常认为其与微生物生物量正相关。干旱区由于降水和温度的限制, 植物生物量积累较低, 导致输入到土壤中的有机质较少; 此外, 与其他类型土壤相比, 研究区广泛分布的风沙土较弱的保水保肥能力, 可能进一步阻碍了微生物生物量的积累^[18]。全球尺度上, 微生物生物量 C:N 的变化范围为 3—24(摩尔比, 下同)、N:P 为 1—55, 平均 C:P 为 59.5^[11]。本研究中, 转化后的 C:N 为 6.69、C:P 为 73.21、N:P 为 11.07, 接近全球尺度的平均水平, 但高于我国草原区的报道值^[37-38]。结合微生物生物量 C、N、P 的变化特点, 较高的微生物生物量 C:N:P 生态化学计量比证实了 P 可能是研究区微生物的主要限制因子^[18]。

3.2 电厂周围叶片和微生物元素内稳性

本研究中, 与微生物相比叶片各指标的变异系数较小, 尤其全 C (图 2); 微生物生物量 C 与 N、C 与 N 以及 N 与 P 间均极显著相关, 而植物叶片三种元素间未呈现出明显的相关性(图 3); 此外, 叶片全 N、全 P 和 N:P 内稳性较高, 微生物元素内稳性较低(图 4)。这可能意味着, 当土壤环境发生改变时, 研究区植物可

以保持相对稳定的叶片元素生态化学计量关系,与科尔沁沙地植物的反应相似^[39]。但其元素间耦合关系较弱,反映了植物群落中不同物种对贫瘠养分环境的适应策略的差异性;微生物元素内稳性较弱,且 N:P 内稳性>P 内稳性>N 内稳性。这可能是由于高浓度外源 N 输入会引起微生物功能改变和活性降低^[40],进而导致其元素内稳性下降。此时,微生物可以通过提高磷酸酶活性来削弱 P 限制(图 6),以维持 P 和 N 的协同固持^[41]。这不仅反映了微生物养分获取对土壤基质养分状况的依赖,而且其生态化学计量关系对土壤环境变化敏感,可作为表征土壤肥力状况的生物学指标^[42]。

3.3 电厂周围叶片和微生物生态化学计量特征的影响因素

研究表明,外源 S 输入(自然沉降或人为添加)可以增加石灰性土壤 N 有效性^[43]、活化难溶解态土壤 P 化合物^[44]、促进植物对 N 和 P 的协同吸收^[45]。本研究中,相较土壤性质,SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 沉降量对叶片和微生物生态化学计量特征的贡献较大(表 3 和表 4)。SO₄²⁻ 沉降量与叶片全 P、叶片 C:N 以及微生物生物量(C、N、P)呈正的相关性,与叶片全 N、叶片 C:P、叶片 N:P 以及微生物生物量 C:N:P 生态化学计量比呈负的相关性,进一步证实了研究区当前 SO₄²⁻ 沉降强度缓解了植物 P 限制和微生物 N、P 限制,因此促进了植物对 P 的摄取和微生物对 C、N 和 P 的固持^[18]。N 沉降(无机 N 和 NO₃⁻)则呈现出与 SO₄²⁻ 沉降相反的效应。其可能原因在于两方面:其一,少量 N 沉降一定程度上缓解了植物 N 限制、促进了植物 N 吸收,但高量 NO₃⁻ 沉降加速了土壤 NH₄⁺ 硝化^[46]、增强了土壤 P 限制,从而导致植物与微生物间资源竞争加剧、抑制了叶片 P 吸收和微生物生长;其二,N 沉降有助于提高植物地上部分生物量,从而增加了土壤有机 C 输入、刺激了生态系统 C 循环、提高了微生物对 C 的利用效率,导致较高的微生物生物量 C:X^[47]。

此外,土壤酶活性和含水量也显著影响着叶片和微生物生态化学计量特征(表 3 和表 4):蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性均与微生物生物量(C、N、P)正相关,而与 C:N:P 生态化学计量比负相关。研究发现,土壤酶活性与微生物代谢活动间存在着耦合关系^[48]。本研究中随着三种酶活性的增加,微生物固持有有机物的能力增强,进而导致其 C:N 和 C:P 降低^[18];反过来,随着微生物活性的增强,其会分泌更多的酶以矿化有机物^[49-50]。就植物而言,3 种酶活性与叶片 C:N 正相关,与全 N 和 N:P 负相关,与黄土丘陵区撂荒草地略有不同^[51]。土壤水分在植物和微生物生理过程中扮演着重要角色,其不仅可以调节植物根系对养分的吸收、也决定着微生物可用底物和细胞水化基质的扩散速率^[52]。本研究发现,土壤含水量与叶片全 N 呈负的相关性。这可能是由于当土壤含水量较高时,沙质土壤 N 损失风险增加(如淋溶),导致土壤 N 受限性升高,从而阻碍根系对 N 的吸收^[18]。此外,有研究发现土壤电导率亦调控着植物 C:N:P 生态化学计量特征^[53]。本研究中,虽然土壤电导率在 3 个电厂间存在较大差异(表 1),但其对叶片和微生物生态化学计量特征的影响均不显著,有待深入研究。

4 结论

综合以上分析,与受人类活动影响较少的同类型区相比,研究区具有较高的土壤有机 C 水平和 N、P 供给能力,且 P 相较 N 丰富。植物可能主要受 N 限制,微生物则主要受 P 限制;叶片元素内稳性较强,表明其元素生态化学计量关系在土壤环境发生变化时可以保持相对较高的稳定性。微生物元素内稳性较弱,意味着其生态化学计量关系对土壤环境变化敏感,可作为表征土壤肥力状况的生物学指标;SO₄²⁻ 沉降有助于叶片 P 摄取和微生物 C、N、P 固持。少量 NO₃⁻ 沉降有利于叶片 N 吸收,但持续增加的 NO₃⁻ 沉降可能会使土壤 P 受限性增强,进而抑制叶片 P 摄取和微生物生物量积累。此外,土壤酶活性、Ca²⁺ 和含水量也调控着叶片和微生物元素平衡特征。

鉴于酸沉降效应的时间累积性、元素受限类型判定标准的复杂性、研究区土壤偏碱性以及 3 个电厂在土壤含水量和盐渍化程度等方面存在的较大差异,今后还需结合多个电厂的观测值(酸沉降、土壤性质和植物状况等),通过长期的定位观测深入探讨植物-微生物-土壤元素生态化学计量特征及其驱动因子,为科学评估工业排放源周边酸沉降的累积效应提供有力的数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] Wright L P, Zhang L M, Cheng I, Aherne J, Wentworth G R. Impacts and effects indicators of atmospheric deposition of major pollutants to various ecosystems-A Review. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(8): 1953-1992.
- [2] Vet R, Artz R S, Carou S, Shaw M, Ro C U, Aas W, Baker A, Bowersox V C, Dentener F, Galy-Lacaux C, Hou A, Pienaar J J, Gillett R, Forti M C, Gromov S, Hara H, Khodzher T, Mahowald N M, Nickovic S, Rao P S R, Reid N W. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 2014, 93: 3-100.
- [3] Yu H L, He N P, Wang Q F, Zhu J X, Gao Y, Zhang Y H, Jia Y L, Yu G R. Development of atmospheric acid deposition in China from the 1990s to the 2010s. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 182-190.
- [4] 顾峰雪, 黄玫, 张远东, 闫慧敏, 李洁, 郭瑞, 钟秀丽. 1961-2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究. *生态学报*, 2016, 36(12): 3591-3600.
- [5] Zhang X Y, Chuai X W, Liu L, Zhang W T, Lu X H, Zhao L M, Chen D M. Decadal trends in wet sulfur deposition in China estimated from OMI SO₂ columns. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(18): 10796-10811.
- [6] 段雷, 郝吉明, 谢绍东, 周中平. 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷. *环境科学*, 2002, 23(2): 7-12.
- [7] Gao Y, Ma M Z, Yang T, Chen W L, Yang T T. Global atmospheric sulfur deposition and associated impact on nitrogen cycling in ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 1-9.
- [8] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [9] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, Datta A, Li P, Ma W H, Mohammad A, Shen H H, Hu H F, Knapp B O, Smith P. Stoichiometric shifts in surface soils over broad geographical scales; evidence from China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(8): 947-955.
- [10] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, Swenson N G, Enquist B J. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [11] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [12] Yuan Z Y, Chen H Y H. Decoupling of nitrogen and phosphorus in terrestrial plants associated with global changes. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 465-469.
- [13] Yue K, Fornara D A, Yang W Q, Peng Y, Li Z J, Wu F Z, Peng C H. Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: a global synthesis. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2450-2463.
- [14] Mayor J R, Mack M C, Schuur E A G. Decoupled stoichiometric, isotopic, and fungal responses of an ectomycorrhizal black spruce forest to nitrogen and phosphorus additions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 247-256.
- [15] 王金相. 西北地区典型能源工业基地排放对局地环境空气质量的影响. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2018.
- [16] 王攀, 朱湾湾, 樊瑾, 许艺馨, 余海龙, 王斌, 黄菊莹. 宁夏燃煤电厂周围降水降尘中硫氮沉降特征研究. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1189-1197.
- [17] Luo W T, Nelson P N, Li M H, Cai J P, Zhang Y Y, Zhang Y G, Yang S, Wang R Z, Wang Z W, Wu Y N, Han X G, Jiang Y. Contrasting pH buffering patterns in neutral-alkaline soils along a 3600 km transect in northern China. *Biogeosciences*, 2015, 12(23): 7047-7056. 5602979.
- [18] 王攀. 基于化学计量学的宁东燃煤电厂周围大气氮硫沉降生态效应研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [19] 邢建伟, 宋金明, 袁华茂, 李学刚, 李宁, 龙爱民. 胶州湾大气活性硅酸盐干沉降特征及其生态效应. *生态学报*, 2020, 40(9): 3096-3104.
- [20] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB/T 15265—1994 环境空气 降尘的测定 重量法. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [21] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [22] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 高洪军, 朱平, 徐明岗, 张文菊. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征. *生态学报*, 2018, 38(11): 3848-3858.
- [23] 蒋利玲, 曾从盛, 邵钧炯, 周旭辉. 闽江河口入侵互花米草和本地种短叶荳芎的养分动态及植物化学计量内稳性特征. *植物生态学报*, 2017, 41(4): 450-460.
- [24] Persson J, Fink P, Goto A, Hood J M, Jonas J, Kato S. To be or not to be what you eat; regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs. *Oikos*, 2010, 119(5): 741-751.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data.

- Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [26] Li Y L, Jing C, Mao W, Cui D, Wang X Y, Zhao X Y. N and P resorption in a pioneer shrub (*Artemisia halodendron*) inhabiting severely desertified lands of Northern China. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(2): 174-185.
- [27] Wen H Y, Niu D C, Fu H, Kang J. Experimental investigation on soil carbon, nitrogen, and their components under grazing and livestock exclusion in steppe and desert steppe grasslands, Northwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3131-3141.
- [28] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [29] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [30] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 孙殿超, 毕京东. 科尔沁沙地主要植物细根和叶片碳、氮、磷化学计量特征. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1069-1080.
- [31] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D L, Flynn D F B, Geng Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [32] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(6): 945-952.
- [33] 冯婵莹, 郑成洋, 田地. 氮添加对森林植物磷含量的影响及其机制. *植物生态学报*, 2019, 43(3): 185-196.
- [34] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [35] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [36] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [37] Zhao H, Sun J, Xu X L, Qin X J. Stoichiometry of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in China's temperate and alpine grasslands. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 83: 1-8.
- [38] 任成杰. 黄土高原植被-土壤协同恢复效应及微生物响应机理[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [39] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 张子谦. 科尔沁沙地优势固沙灌木叶片氮磷化学计量内稳性. *植物生态学报*, 2019, 43(1): 46-54.
- [40] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 叶永昌, 刘颂颂, 徐国良, 倪杰. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(5): 1422-1433.
- [41] Dong C C, Wang W, Liu H Y, Xu X T, Zeng H. Temperate grassland shifted from nitrogen to phosphorus limitation induced by degradation and nitrogen deposition: evidence from soil extracellular enzyme stoichiometry. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 453-464.
- [42] 邓健, 张丹, 张伟, 任成杰, 郝雯晖, 刘冲, 韩新辉, 杨改河. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征. *生态学报*, 2019, 39(15): 5527-5535.
- [43] Brown L, Scholefield D, Jewkes E C, Preedy N, Wadge K, Butler M. The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. *The Journal of Agricultural Science*, 2000, 135(2): 131-138.
- [44] Rezapour S. Effect of sulfur and composted manure on $\text{SO}_4\text{-S}$, P and micronutrient availability in a calcareous saline-sodic soil. *Chemistry and Ecology*, 2014, 30(2): 147-155.
- [45] 姜勇, 李天鹏, 冯雪, 王汝振, 张玉革. 外源硫输入对草地土壤-植物系统养分有效性的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1192-1201.
- [46] Zhu Q C, De Vries W, Liu X J, Zeng M F, Hao T X, Du E Z, Zhang F S, Shen J B. The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 215-222.
- [47] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1111-1120.
- [48] Jian S Y, Li J W, Chen J, Wang G S, Mayes M A, Dzantor K E, Hui D F, Luo Y Q. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 101: 32-43.
- [49] Marklein A R, Houlton B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2012, 193(3): 696-704.
- [50] 闫钟清, 齐玉春, 李素俭, 董云社, 彭琴, 贺云龙, 李兆林. 降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响研究进展. *微生物学通报*, 2017, 44(6): 1481-1490.
- [51] 高德新. 典型退耕林(草)地土壤酶化学计量特征与土壤-植物碳氮磷元素的响应关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [52] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. *Ecology*, 2012, 93(4): 930-938.
- [53] 安申群, 贡璐, 朱美玲, 李红林, 解丽娜, 罗艳. 塔里木盆地北缘典型荒漠植物根系化学计量特征及其与土壤理化因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(16): 5444-5450.