黔中煤矿区矸石堆场周边土壤藻类群落变化及其影响因素*

梁春芳 刘 方** 卜通达 凌邦元 李婷婷
(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘 要 通过对贵阳市花溪区麦坪乡煤矿区矸石堆场周边土壤进行采样分析,研究了煤矸石影响下土壤藻类群落组成和生物量的变化以及生物量、物种多样性指数与土壤因子之间的相关关系。结果表明:该区自然土壤藻类共计5门43属,其中蓝藻门(Cyanophyta)13个属、绿藻门(Chlorophyta)17个属、硅藻门(Bacillariophyta)7个属。受煤矸石污染后,土壤藻类的种类和数量明显减少,污染严重区域土壤藻类中蓝藻门仅有3个属、绿藻门4个属;香浓指数与有效铁、有效锰及速效磷含量之间存在极显著的相关性;物种丰富度与pH值和速效磷含量呈显著相关。污染严重区土壤藻类叶绿素a含量比对照区减少了93.1%;藻类生物量与pH值呈显著正相关,与有效铁含量呈显著负相关。调查区内土壤pH值和有效铁含量是影响土壤藻类生长的重要因子。

关键词 煤矸石; 土壤藻类; 藻类生物量; 土壤因子
中图分类号 X 171.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)2-0304-07

Changes of soil algal composition and their affecting factors in the periphery of gangue yard within a coal mining area in central Guizhou Province. LIANG Chun-fang, LIU Fang**, PU Tong-da, LING Bang-yuan, LI Ting-ting (*College of Agriculture*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(2): 304-310.

Abstract: Soil samples were collected from the periphery of gangue yard within the coal mining area in Maiping township of Huaxi District, Guiyang City to study the changes of soil algal composition, diversity, and biomass, and their correlations with soil factors. In un-contaminated soils, the observed algae consisted of five phyla and forty-three genera, with thirteen genera of Cyanophyta, seventeen genera of Chlorophyta, and seven genera of Bacillariophyta. After the contamination of coal gangue, the richness and individual density of soil algae decreased obviously. At seriously contaminated sites, Cyanophyta only had three genera, and Chlorophyta only had four genera. The Shannon index of soil algae had significant correlations with soil available Fe, Mn, and P, while the species richness had significant correlations with soil pH and available P. The chlorophyll content of soil algae at seriously contaminated sites was decreased by 93.1%, compared with that at un-contaminated sites. The algal biomass was significantly positively correlated with soil pH and negatively correlated with soil available Fe, suggesting that soil pH and available Fe were the important factors affecting the soil algal growth in the periphery of coal gangue yard.

Key words: coal gangue; soil algae; algal biomass; soil factor.

土壤藻是指分布在土壤表层、土壤下层及与土壤的形成、演替和土壤组成有关的石生、水-陆生的各种藻类的集合群(刘永定和黎尚豪,1993),在土壤的保水、改良、防风固沙及全球气候变化方面都有明显的生态功能。目前我国学者对耕地土壤、荒漠土壤的藻类进行了一些研究(苏振宏,2006),研究内容主要集中在土壤藻类区系、藻种分离和纯化、藻类生物学,包括生理生化、遗传、生态等方面,但就土壤藻类生长与土壤质量变化的关系还研究较少。煤

* 贵阳市科技局社会发展研究专项项目(2009-3-0419)资助。
** 通讯作者 E-mail: lfang6435@163.com
收稿日期: 2010-09-09 接受日期: 2010-11-27

是贵州最重要的能源矿产,是全省矿业的重要支柱,在发展贵州经济中具有显著的作用(韦天骄,1996)。然而,煤矿开采中产生的煤矸石对周围环境造成了严重的污染,煤矸石的污染严重破坏了矿区生态系统及植物生长基质(傅华龙和陈照麟,1993),同时也影响到表层土壤中藻类的生长。因此,本文通过对废弃煤矿区矸石堆场周边土壤藻类的生长状况进行调查,研究煤矸石影响下土壤藻类群落和生物量的变化,为煤矿区矸石堆场周边污染土壤的治理及植被恢复提供科学依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究地区为贵州省贵阳市花溪区麦坪乡,该区属低山地貌,主要土壤类型为黄壤。山上生长有马尾松和油茶树。年平均气温 14.9 ℃,年降雨量在 1100 ~ 1200 mm(魏嵬等,2009)。麦坪乡是花溪区的重要产煤区,历史上曾拥有大小煤窑 200 余口,到 1996 年该乡通过煤窑整治后还有 62 口,年产煤 70 余万吨。目前,麦坪乡仅存 22 口符合国家要求的煤井,年产量也降至 30 万 t。麦坪乡关闭的煤矿经过多年开采,废弃的煤矸石堆积对环境造成明显的影响(邓为难等,2009)。调查区废弃煤矸石堆放长达 20 年,矸石堆场主要呈小丘状分布在山坡中部,距矸石堆场下方约 500 m 处有稻田分布,稻田受到矸石堆场酸性排水的影响。

1.2 土壤样品采集

在 2010 年 4 月初,在调查区(106°34′16″E,26°28′8″N,海拔 1242 m)内选择 2 个典型的煤矸石堆,沿水流的方向,根据离煤矸石堆距离的不同,采集调查区煤矸石堆周边的土壤样品,共设置 7 个采样区,每个采样区设置 3 个采样点,采样区的具体分布见图 1。第 1 个煤矸石堆位于沟谷,选择旁边的坡地设置对照区(样区 1),该区位于煤矸石堆场上方的坡地,未受到煤矸石的影响,地势较平缓,有良好的草本植物生长,采集的样品全部由土壤组成;在煤矸石堆中心处设置样区 2,该煤矸石已堆放 20 年左右,由于长时间的雨水淋溶及风化作用,表层煤矸石已变成粉末状的物质,采集样品全部是煤矸石粉末;在煤矸石堆边缘下部设置样区 3,该区位于雨水冲刷方向距煤矸石堆约 80 m 处,地势较平缓,土壤受煤矸石堆场地表径流的直接影响,采集的样品为煤矸石粉末和土壤的混合物(比例约为 1∶7);选择煤矸石堆场下方的稻田设置样区 4,该区受煤矸石堆酸性排水的影响,距煤矸石堆约 500 m,采集的样品全部是土壤。第 2 煤矸石堆位于第 1 煤矸石堆附近山坡中部的坡面上,在堆放煤矸石坡面的下方约 100 m 处设置样区 5,采集的样品是煤矸石小颗粒与土壤的混合物(比例约为 1∶5);在煤矸石堆边缘设置样区 6,该区受煤矸石的直接影响,采集的样品为煤矸石小颗粒与土壤的混合物(比例约为 1∶3);在堆放煤矸石的坡脚设置样区 7,该区位于煤矸石堆下方约 300 m 处,地势较平缓,种植有桃树,还有少量草本植物,采集的样品为煤矸石小颗粒与土壤的混合物(比例约为 1∶6)。

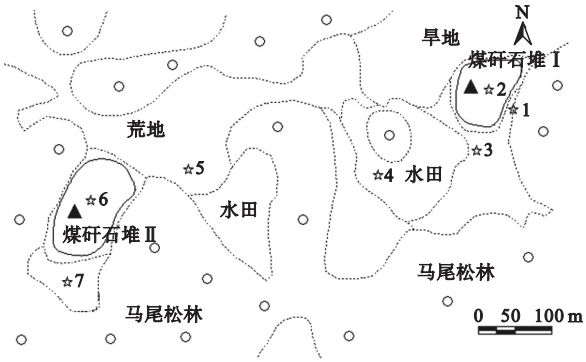

图 1 采样点示意图

Fig. 1 Sketch map of spatial position of sampling sites

○:马尾松林;▲:煤矸石堆;☆:采样点。1:对照土壤;2:煤矸石堆风化矸石;3:酸性排水污染土壤(重);4:酸性排水污染土壤(轻);5:煤矸石直接污染土壤(中);6:煤矸石直接污染土壤(重);7:煤矸石直接污染土壤(轻)。

采集土壤样品时,在采样区随机设置 3 个 50 cm×50 cm 的小样方,在小样方内随机选择 3 点进行混合取样。采样时用采集刀将土面切成一个断面,用有刻度的钢尺(精确到 mm)测量,采集 0 ~ 2 cm 的表层土壤,用封口塑料袋分别收集样品,记录采集土壤样品的生境,并迅速运至实验室备用(吴楠等,2007)。每次采样后用 70% 酒精擦拭采样工具,以防交叉污染(张丙昌等,2005)。运回实验室的样品取部分放入 4 ℃冰箱,用于土壤藻类的观察。其余样品放在暗处自然风干,其中部分过 2 mm 的土壤筛,用于土壤理化性质的测定;部分于干燥器中遮光保藏,用于叶绿素 a 含量的测定,测定时取出其在暗处用研钵碾磨,以使藻体与土壤或煤矸石颗粒分离,并使藻体分散(兰书斌等,2009)。

1.3 土壤分析方法

1.3.1 土壤藻类观察及鉴定 直接观察:将采集的 0 ~ 2 cm 的表层土壤样品放入试管内以蒸馏水稀

释,制成均一的土壤悬浊液,取一滴制作临时装片观察并照相(观察时用 Leica DMLB2 荧光显微镜)。对观察到的藻类及拍摄的图片,根据其形态、结构、大小等特点,利用《中国淡水藻类》、《中国淡水藻类:系统、分类及生态》等参考书,将其鉴定到属(张丙昌,2006)。

1.3.2 生物量的测定 藻类生物量用表层土壤叶绿素 a 含量表示(测的是土壤藻类中总的叶绿素 a 含量),叶绿素 a 含量虽然不能反映生物的群落组成,但仍不失为检测浮游植物生物量的最好方法之一(Wright *et al.*,1997)。在生物土壤结皮的研究中,不少学者也认为用叶绿素 a 评估其中光合生物的生物量较便易(Bell & Sommerfeld,1987;Hawkes,2001;Chen *et al.*,2006;Xie *et al.*,2007),而且分光光度法因其操作简便、可靠性强被广泛采用(杨彩根等,2007)。

本研究所测叶绿素 a 含量采用热乙醇(80 ℃)萃取分光光度法,利用 Unic 7200 分光光度计测定吸光值(陈宇炜和高锡云,2000;Hawkes,2001;杨彩根等,2007)。称取 1 g 样品置于具塞刻度试管中,加入 10 ml 95% 热乙醇(80 ℃)(该处理预先置于 −20 ℃的冰箱中 15 h),摇匀后将其在恒温水浴锅中 80 ℃萃取 2 min,之后置于 4 ℃的冰箱中黑暗静置 6 h。然后,4000 r·min^{-1}离心 10 min(离心时使用菲恰尔 DL-5B 离心机),然后取上清液于波长 665 nm 和 750 nm 处测吸光值,然后再加 0.25 ml 1 mol·L^{-1}盐酸酸化,10 min 后于波长 665 nm 和 750 nm 处再测吸光值。

计算公式为:$Chla_{乙醇} = 27.9 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V/M$

式中:$Chla_{乙醇}$为乙醇法测定的叶绿素 a 含量(μg·g^{-1});E_{665}和 E_{750}为萃取液酸化前于波长 665 nm 和 750 nm 处的吸光值;A_{665}和 A_{750}为萃取液酸化后于波长 665 nm 和 750 nm 处的吸光值;V 为萃取液的体积(ml);M 为称取结皮土样的量(g)(兰书斌等,2009)。

1.3.3 土壤理化分析 参照《土壤分析技术规范》,土壤 pH 值的测定采用电位法;土壤有效铁和有效锰的测定采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法;土壤有效硫的测定采用磷酸盐-乙酸比浊法;土壤速效氮的测定采用碱解扩散法;土壤速效磷的测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法和盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法;土壤速效钾的测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析法对土壤理化性质和叶绿素 a 含量进行方差分析并进行 LSD 多重比较;采用 SPSS 软件对土壤藻类生物量和土壤各因子进行 Pearson 相关性分析。多样性指数选用以下指标:物种丰富度,香浓指数及优势度指数。采用去势典范对应分析(DCCA)法对土壤因子与藻类属的数量进行分析,应用国际标准软件 Canoco for Windows 4.5 进行数据运算,应用 CanoDraw for Windows 对运算结果进行作图。

2 结果与分析

2.1 煤矸石堆场周边土壤主要理化性质的变化

由表 1 可见,pH 值的变化范围为 3.02 ~ 4.24,受煤矸石污染的土壤酸度明显增加。此外,污染区土壤有效硫、有效铁含量明显高于未污染区,但在煤矸石直接污染区及酸性排水污染区,无显著差异。未污染土壤有效锰、速效氮和速效磷含量明显高于受煤矸石污染的土壤,这可能与污染区植被稀少有关;而土壤速效钾含量在不同区域变化不大。值得一

表 1 不同样区土壤的化学性质及表层土壤叶绿素 a 含量变化

Table 1 Variation of soil chemical properties and Chl-a content in top soil in different sample area

样号	叶绿素 a (μg·g^{-1})	pH (H_2O)	有效硫 (mg·kg^{-1})	有效铁 (mg·kg^{-1})	有效锰 (mg·kg^{-1})	速效氮 (mg·kg^{-1})	速效磷 (mg·kg^{-1})	速效钾 (mg·kg^{-1})
1	2.03±0.48 a	4.24±0.24 a	116.0±27.4 c	86.6±14.5 c	77.9±3.0 a	194±81 a	45.8±25.3 a	180±44 ab
2	0.51±0.21 bc	3.02±0.47 d	642.1±51.5 a	176.4±6.1 a	14.2±0.9 c	156±36 ab	16.9±8.6 b	73±42 c
3	1.77±0.91 a	3.17±0.17 cd	654.8±94.9 a	141.4±33.3 b	31.0±19.8 b	96±36 bc	8.9±6.7 b	143±15 bc
4	2.00±0.08 a	4.05±0.10 ab	396.8±123.6 b	135.9±10.0 b	16.4±0.5 bc	155±8 ab	6.3±3.0 b	243±15 a
5	0.98±0.73 abc	3.65±0.31 bc	231.3±103.5 c	154.3±20.3 ab	23.2±8.5 bc	87±2 bc	12.4±2.3 b	183±68 ab
6	0.14±0.24 c	3.03±0.09 d	411.1±85.9 b	162.4±10.1 ab	24.2±9.4 bc	77±30 c	1.9±3.3 b	163±51 ab
7	1.39±0.97 ab	3.26±0.60 cd	693.5±34.7 a	149.0±14.8 ab	15.6±3.4 bc	201±44 a	6.0±5.2 b	140±61 bc

表中数字为平均值±标准差,同列不同字母表示各样区间差异显著($P<0.05$)。1:对照土壤;2:煤矸石堆风化矸石;3:酸性排水污染土壤(重);4:酸性排水污染土壤(轻);5:煤矸石直接污染土壤(中);6:煤矸石直接污染土壤(重);7:煤矸石直接污染土壤(轻)。

提的是,4 号样区为稻田,土壤速效钾的含量最高;7 号样区为果园,土壤速效氮含量最高,可能受人为施肥的影响,其变化不符合以上规律。

2.2 煤矸石堆场周边土壤藻类生物量的变化

由表 1 可见,不同环境下叶绿素 a 含量有明显差异,其变化范围为 0.14 ~ 2.03 $\mu g \cdot g^{-1}$。受煤矸石污染严重的区域比未污染区土壤生物量减少了 93.1%。多重比较的结果表明,受煤矸石直接污染的区域叶绿素 a 含量与其他各区存在显著性差异。

各样区叶绿素 a 含量按从大到小的排列顺序是:未污染区>酸性排水污染区(轻)>酸性排水污染区(重)>煤矸石直接污染土壤(轻)>煤矸石直接污染区(中)>煤矸石堆中心区>煤矸石直接污染区(重)。由上可知,煤矸石污染可以降低表层土壤叶绿素 a 的含量;其中,煤矸石直接污染区的生物量比酸性排水污染区的生物量少,其原因是煤矸石进入土壤后严重影响了其表层土壤中藻类生物量的大小。样区 2(煤矸石堆中心区)的土壤藻类生物量比样区 6(煤矸石直接污染区)的生物量大,这可能是样区 6 的煤矸石比样区 2 的煤矸石的风化程度小,从而导致藻类生物量减少。

不同生态环境下土壤藻类生物量与土壤各因子的相关关系分析表明(表 3),贵阳市花溪区麦坪乡煤矿区矸石堆场周边表层土壤藻类叶绿素 a 含量与 pH 值呈显著正相关,而与有效铁含量呈显著负相关。综上可以看出,pH 值和有效铁的含量对表层土壤藻类生物量有很大影响,但其影响机制尚有待于进一步的研究。此外,土壤含水量对土壤藻类生长也有明显的影响,关于影响结皮中藻类生物量的环境因子,一般与当地降水量或土壤用水呈正相关(胡春香等,2003)。但本研究未测土壤含水量,以后需要补充研究。

2.3 煤矸石堆场周边土壤藻类群落的变化

鉴定结果表明,贵阳市花溪区麦坪乡煤矿区矸石堆场周边表层土壤藻类共计 5 门 43 属(表 2),主要包括蓝藻门(Cyanophyta)13 个属、绿藻门(Chlorophyta)17 个属、硅藻门(Bacillariophyta)7 个属、甲藻门(Pyrrophyta)4 个属、红藻门(Rhodophyta)和裸藻门(Euglenophyta)各 1 个属。各属在不同生态环境下出现次数最多的是蓝杆藻属和羽纹藻属,出现了 6 次,几乎所有样区都有出现;色球藻属、绿球藻属、微孢藻属、小球藻属、舟形藻属和裸藻属出现了 5 次;双星藻属、双胞藻属、粘球藻属、真枝藻属和隐球藻属出现了 4 次;管饱藻属、腔球藻属、微囊藻属、柱胞鼓藻属、柱形鼓藻属和多甲藻属出现了 3 次,其余的都只出现 2 次或 1 次。该区优势属为蓝杆藻属和羽纹藻属,说明其比较适合在煤矸石堆场周边区域生长。

由表 2 可见,未受煤矸石污染土壤中藻类门的个数最多为 6 个,分别为蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、红藻门和裸藻门,以蓝藻门和绿藻门为主;受煤矸石直接污染区域土壤中的藻类门的个数为 3 ~ 4 个,以蓝藻门和绿藻门为主,但其属的个数比未污染土壤中的少;受煤矸石堆酸性排水影响的区域土壤藻类门的个数为 4 ~ 5 个,以蓝藻门和绿藻门为主,属的个数亦比未受污染区域土壤中的少。值得一提的是,受煤矸石堆场酸性排水污染的水稻土中硅藻门含的属最多(5 个)。

由表 2 可知,研究区域内共有 43 个属,其中蓝藻门 13 个属,占总属数的 30.2%;绿藻门 17 个属,占总属数的 39.5%;硅藻门 7 个属,占总属数的 16.3%;甲藻门 4 个属,占总属数的 9.3%;裸藻门和红藻门都含有 1 个属,占总属数的 2.3%。未受污染区 23 个属,占总属数的 53.5%,其特有属是:拟鱼腥藻属、紫球藻属、纤维藻属、裂丝藻属、小桩藻属、双眉藻属、角甲藻属、薄甲藻属。受煤矸石直接污染的区域最多 16 个属,占总属数的 37.2%,其特有属是:列管藻属、胶囊藻属、筒藻属、实球藻属、腔球藻、星球藻属、菱形藻属。受煤矸石酸性排水污染的区域最多的有 17 个属,占总属数的 39.5%,其特有属是辐节藻属和桥弯藻属。

由图 2 可以看出,土壤藻类在未污染区的物种丰富度最大为 23,在被酸性排水污染比较严重的区域物种丰富度最小为 12;香浓指数的大小与此一致,在未污染区亦最大为 3.14,在酸性排水污染比较严重区域最小为 2.48;说明在未污染区土壤藻类属的个数最多,种类亦最多,煤矸石的污染使土壤藻类的种类和数量明显的减少。优势度指数的大小在各样区之间相差不大,此次多样性指数的算法是按照藻类属的存在与否计算的,没有计算藻类的相对多度,但是其仍可以表示出不同样区土壤藻类多样性的差异。

2.4 土壤藻类物种多样性与土壤因子的关系

由于调查区的海拔变化范围不大,样地的气候环境相似,所以由海拔变化所引起的热量、水分等气候因素对于土壤藻类多样性的影响不大。本文主要

表2 调查区不同样地土壤藻类统计

Table 2 Statistical results of soil algae in the studied region

藻类组成	样区编号							属出现次数
	1	2	3	4	5	6	7	
蓝藻门 Cyanophyta (13)	8	5	3	6	4	7	6	
管孢藻属(*Chamaesiphon*)	+	−	−	+	+	−	−	3
蓝杆藻属(*Cyanothece*)	+	+	+	+	−	+	+	6
色球藻属(*Chroococcus*)	+	−	+	+	+	+	−	5
颤藻属(*Oscillatoria*)	+	−	−	−	−	−	+	2
腔球藻属(*Coelosphaerium*)	+	+	−	−	−	+	−	3
隐球藻属(*Aphanocapsa*)	+	−	−	+	+	−	+	4
真枝藻属(*Stig onema*)	+	+	−	−	−	+	+	4
拟鱼腥藻属(*Anabaenopsis*)	+	−	−	−	−	−	−	1
粘球藻属(*Gloeocapsa*)	−	+	−	+	−	+	+	4
列管藻属(*Stichosiphon*)	−	+	−	−	−	−	−	1
束球藻属(*Gomphosphaeria*)	−	−	+	−	−	−	+	2
微囊藻属(*Microcystis*)	−	−	−	+	+	+	−	3
星球藻属(*Asterocapsa*)	−	−	−	−	−	+	−	1
绿藻门 Chlorophyta (17)	8	7	6	4	9	5	7	
链丝藻属(*Hormidium*)	+	+	−	−	−	−	−	2
双胞藻属(*Geminella*)	+	−	+	−	−	+	+	4
纤维藻属(*Ankistrodesmus*)	+	−	−	−	−	−	−	1
裂丝藻属(*Stichococcus*)	+	−	−	−	−	−	−	1
小桩藻属(*Characium*)	+	−	−	−	−	−	−	1
绿球藻属(*Chlorococcum*)	+	+	−	+	+	−	+	5
柱胞鼓藻属(*Cylindrocystis*)	+	−	−	−	+	+	−	3
丝藻属(*Ulothrix*)	+	+	+	−	+	−	+	5
胶囊藻属(*Gloeocystis*)	−	+	−	−	−	−	−	1
微孢藻属(*Microspora*)	−	+	+	−	+	+	+	5
团藻属(*Volvox*)	−	+	−	+	−	−	−	2
小球藻属(*Chlorella*)	−	+	+	+	+	−	+	5
双星藻属(*Zygnema*)	−	−	+	−	+	+	+	4
骈胞藻属(*Binuclearia*)	−	−	+	−	−	+	−	2
柱形鼓藻属(*Penium*)	−	−	−	+	+	−	+	3
筒藻属(*Cylindrocapsa*)	−	−	−	−	+	−	−	1
实球藻属(*Pandorina*)	−	−	−	−	+	−	−	1
硅藻门 Bacillariophyta (7)	3	2	2	5	3	2	0	
双眉藻属(*Amphora*)	+	−	−	−	−	−	−	1
舟形藻属(*Navicula*)	+	+	+	+	+	−	−	5
羽纹藻属(*Pinnularia*)	+	+	+	+	+	+	−	6
针杆藻属(*Synedra*)	−	−	−	+	+	−	−	2
辐节藻属(*Stauroneis*)	−	−	−	+	−	−	−	1
桥弯藻属(*Cymbella*)	−	−	−	+	−	−	−	1
菱形藻属(*Nitzschia*)	−	−	−	−	−	+	−	1
甲藻门 Pyrrophyta (4)	2	2	0	1	0	0	1	
角甲藻属(*Ceratium*)	+	−	−	−	−	−	−	1
薄甲藻属(*Glenodinium*)	+	−	−	−	−	−	−	1
裸甲藻属(*Gymnodinium*)	−	+	−	−	−	−	−	1
多甲藻属(*Peridinium*)	−	+	−	+	−	−	+	3
裸藻门 Euglenophyta (1)	1	0	1	1	0	1	1	
裸藻属(*Euglena*)	+	−	+	+	−	+	+	5
红藻门 Rhodophyta (1)	1	0	0	0	0	0	0	
紫球藻属(*Porphyridium*)	+	−	−	−	−	−	−	1

+ 存在,−不存在。

表 3 土壤因子与藻类生物量及物种多样性指数之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between soil factors and algal biomass or species diversity index

指标	有效硫	有效铁	有效锰	pH 值	速效氮	速效钾	速效磷
生物量	−0.158	−0.694**	0.402	0.661**	0.345	0.484*	0.352
物种丰富度	−0.712	−0.736	0.735	0.764*	0.635	0.276	0.840*
香浓指数	−0.661	−0.881**	0.961**	0.670	0.498	0.166	0.946**
优势度指数	0.761*	0.622	−0.664	−0.754	−0.511	−0.236	−0.842*

** $P<0.01$; * $P<0.05$。

分析了土壤因素所引起的土壤藻类多样性指数的变化。运用去势典范对应分析(detrended canonical correspondence analysis,DCCA)方法,分析不同样区中 7 个土壤因子(pH 值、有效铁、有效锰、有效硫、速效磷、速效氮和速效钾)与藻类属的分布之间的关系,得到藻类属的空间分布与土壤因子双序图(图 3)。箭头表示土壤因子,箭头连线的长短表示藻类属的分布与该土壤因子相关性的大小,箭头连线在排序中的斜率表示土壤因子与排序轴相关性的大小,箭头所处的象限表示土壤因子与排序轴之间相关性的正负(张金屯,2004)。

由图 3 可见,第 1 排序轴与有效铁、速效磷、有效锰和有效硫相关性显著,沿第 1 排序轴土壤藻类数量呈现向高有效铁和高速效磷、低有效锰和低有效硫方向的综合梯度上分布,基本上反映了有效铁、速效磷、有效锰和有效硫的变异,此外还有其他土壤因子在起作用。第 2 排序轴与速效氮相关性较显著,沿第 2 排序轴,藻类数量呈现向高速效氮方向的综合梯度上分布,因而第 2 排序轴主要反应了速效氮的变异。

选择 7 个土壤因子与物种多样性指数进行相关性分析,分析结果表明(表 3),香浓指数与有效铁呈极显著负相关,与有效锰及速效磷呈极显著正相关,

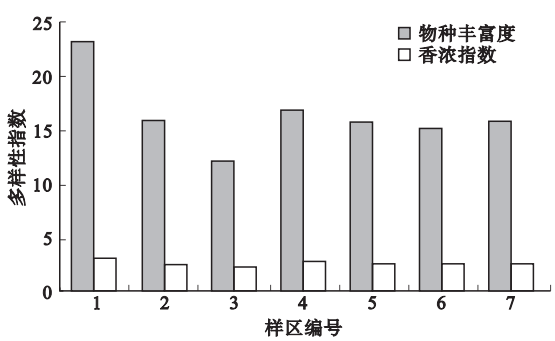

图 2 土壤藻类多样性指数比较

Fig. 2 The comparison of soil algae diversity index

1:对照土壤;2:煤矸石堆风化矸石;3:酸性排水污染土壤(重);4:酸性排水污染土壤(轻);5:煤矸石直接污染土壤(中);6:煤矸石直接污染土壤(重);7:煤矸石直接污染土壤(轻)。

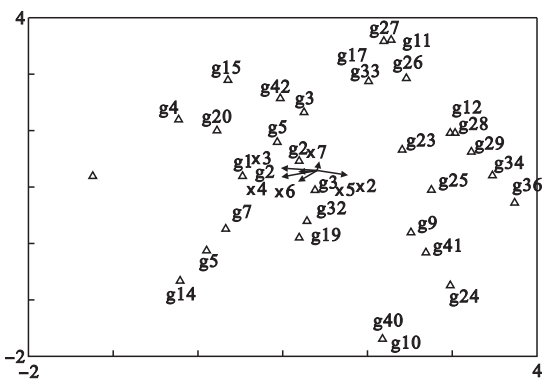

图 3 土壤藻类的 43 个属与 7 个土壤因子的 DCCA 排序图

Fig. 3 Ordination diagram of DCCA between forty-three genus of soil algae and seven soil factors

x1:pH 值,x2:有效铁,x3:有效锰,x4:有效硫,x5:速效磷,x6:速效氮,x7:速效钾;g1 ~ g43 代表藻类的属名。

说明土壤中有效铁、有效锰和速效磷的含量对土壤藻类属的多样性影响较大,土壤中有效铁含量大则土壤藻类多样性相对小。物种丰富度与 pH 值和速效磷呈显著正相关,说明 pH 值与速效磷和土壤藻类属的个数有较大影响。优势度指数与有效硫呈显著正相关,与速效磷呈显著负相关,说明土壤中有效硫含量大,可能导致土壤中某种藻类生长占优势,与此相反,速效磷的含量大则会降低藻类的优势度。另外,优势度指数和物种丰富度及香浓指数均呈负相关,这是由于在优势度较为明显的群落中,优势种排挤其他种,从而使群落物种多样性降低。在生境恶劣的煤矸石堆放区,土壤中占优势的藻类抢占了更多的生存空间,这样就导致了优势度指数与多样性指数的负相关性。

3 结 论

煤矸石堆场周边污染的土壤出现明显酸化,土壤有效硫、有效铁含量明显增加。在煤矸石的影响下,土壤藻类生物量显著减少;土壤藻类生物量与 pH 值呈显著正相关,与有效铁含量呈显著负相关。

研究区内土壤藻类共计 43 个属,其中蓝藻门 13 个属,绿藻门 17 个属。受煤矸石污染后,土壤藻

类的种类和数量明显减少;在污染严重的区域,土壤藻类中蓝藻门仅有3个属、绿藻门有4个属。调查区内土壤pH值和有效铁含量是影响土壤藻类生长的重要因子。

参考文献

陈宇炜, 高锡云. 2000. 浮游植物叶绿素a含量测定方法的比较测定. 湖泊科学, **12**(2): 185-188.

邓为难, 刘 方, 张 玲, 等. 2009. 麦坪乡关闭煤矿区河流底泥污染物释放对上覆水水质的影响. 广西轻工业, (1): 81-83.

傅华龙, 陈照麟. 1993. 藻类学教程. 成都: 四川大学出版社.

胡春香, 张德禄, 刘永定. 2003. 干旱区微小生物结皮中藻类研究的新进展. 自然科学进展, **13**(8): 791-795.

兰书斌, 刘永定, 胡春香. 2009. 不同有机溶剂萃取生物结皮中叶绿素a效率的比较研究. 中国沙漠, **29**(3): 524-528.

刘永定, 黎尚豪. 1993. 土壤藻及其生理生态. 水生生物学报, **17**(3): 272-277.

苏振宏. 2006. 生物结皮中蓝藻多样性及其环境应用研究. 兰州: 西北师范大学.

韦天娇. 1996. 论贵州煤矿的资源优势及开发战略. 贵州地质, **13**(1): 93-97.

魏 嵬, 刘 方, 向仰州. 2009. 贵阳市花溪麦坪煤矿废弃地植被调查与分析. 贵州大学学报(自然科学版), **26**(2): 132-135.

吴 楠, 张元明, 张 静, 等. 2007. 生物结皮恢复过程中土壤生态因子分异特征. 中国沙漠, **27**(3): 397-404.

杨彩根, 宋学宏, 孙丙耀. 2007. 浮游植物叶绿素a含量简易测定方法的比较. 海洋科学, **31**(1): 6-9.

张丙昌, 张元明, 张建成, 等. 2005. 准格尔盆地古尔班通古特沙漠生物结皮蓝藻研究. 地理与地理信息科学, **21**(5): 107-109.

张丙昌. 2006. 荒漠地表生物结皮中藻类区系与生态学研究(硕士学位论文). 石家庄: 河北师范大学.

张金屯. 2004. 数量生态学. 北京: 科学出版社.

Bell RA, Sommerfeld MR. 1987. Algal biomass and primary production within a temperate sandstone. *American Journal of Botany*, **74**: 294-297.

Chen L, Xie Z, Hu C, *et al*. 2006. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, **67**: 521-527.

Hawkes CV. 2001. Methods for studying biological soil crusts// Methodology paper series of the 4th International Conference on ILTER in East Asia and Pacific Region, Ulaanbaatar-Hat-gal, Mongolia: 36-45.

Wright SW, Jeffrey SW, Mantoura RFC. 1997. Phytoplankton pigments in oceanography: Guidelines to modern methods. Paris: UNESCO.

Xie ZM, Liu YD, Hu CX, *et al*. 2007. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength. *Soil Biology & Biochemistry*, **39**: 567-572.

作者简介 梁春芳,女,1982年生,硕士研究生。研究方向为土壤资源利用与保护。E-mail: chunfangliang@sina.com

责任编辑 魏中青