

宁夏回族自治区沙坡头地区半荒漠土壤中藻类的垂直分布

胡春香¹, 刘永定^{2*}

(1. 西北师范大学生命科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要:对沙坡头地区半荒漠土壤中藻类植物的垂直分布进行了为期一年多的采样、分析, 结果发现结皮层有藻类植物 24 种, 蓝藻及其丝状种类的比例最大; 结皮下 0~50 mm 和 50~100 mm 层次分别有 15 种、10 种, 且都以硅藻及单细胞种类最丰富; 深层次出现的种类在浅层次都出现; 100mm 以下层次没有任何藻种发现。生物量从表及里随深度的增加而锐减, 99% 的分布在结皮层; 就结皮层中 78% 的在 0~0.1 mm 层次, 96% 在 0~1.0 mm 深度。种类数变化在结皮层和结皮下 0~50 mm 层次都与降水量相关, 而结皮下 50~100 mm 层次基本不变。

关键词:荒漠土壤; 藻类; 群落结构; 垂直分布; 沙坡头

Vertical distribution of algae in semi-desert soil of Shapotou area, Ningxia Hui Autonomous Region

HU Chun-Xiang¹, LIU Yong-Ding^{2*} (1. College of Life Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 38~44.

Abstract: Shapotou (37°27'N, 104°57'E) is located in the southeast of Tegger Desert, Zhongwei County, Ningxia Hui Autonomous Region of China. The average annual precipitation is ca. 186 mm (mainly in summer), evaporation more than 2900 mm. The windy days (>5 m/s) are more than 200 days each year. Forty five years ago there was only shifting sand dunes. Since 1956 drought-resistant trees are batch planted each several years under irrigation and non-irrigation conditions. Now the stable algal crusts had formed on the topsoil of those sand dunes. And due to ecological roles in reducing soil erosion degree, algal crusts had been widely investigated from many perspectives. However, no study has proposed algal distribution in the whole soil layer of desert and semi-desert environment, which actually distribute in the deeper layer and affect soil structure and formation. The purposes of this research are to determine the depth of algae distribution in this semi-desert soil, and also to examine the regularities of their distribution and possible mechanism on soil amelioration. Therefore the algal crusts, soil samples of 0~50 mm, 50~

基金项目:中国科学院资源与环境重点资助项目(KZ952-51-207); 国家自然科学基金资助项目(30070154, 30170022); 甘肃省中青年自然科学基金(YS-011-A25-026); 西北师范大学中青年基金资助项目(NWNU-060)

收稿日期:2001-09-08; **修订日期:**2002-01-26

作者简介:胡春香(1965~), 女, 甘肃人, 博士, 副教授。主要从事土壤藻研究。

Foundation item: Supported by the Key Project of the Chinese Academy of Sciences (KZ952-51-207); the National Natural Science Foundation of China (30070154, 30170022); the Mid-youth Natural Science Foundation of Gansu (YS-011-A25-026) and the Mid-youth Science Foundation of Northwest Normal University (NWNU-060)

Received date: 2001-09-08; **Accepted date:** 2002-01-26

Biography: HU Chun-Xiang, Doctor, Associate Professor. Mainly engaged in the research of soil algae.

* 通讯作者 Author for correspondence, Liuyd@ihb.ac.cn

100 mm, 100~150 mm and 150~500 mm depths below the crusts from the surface to lower levels were separately collected and analyzed at the interval of every two months from May 1997 to October 1998. All data were analyzed by statistical software (Statistica 6.0)

The results showed that 24 taxa were found in the crust layer, 15 and 10 taxa separately in 0~50 mm and 50~100 mm depth of below the crusts, no algae in the ranges of below 100 mm depth. Among them the widespread species were *Nostoc* sp., *Microcoleus vaginatus*, *Navicula cryptocephala*, *Chlorella vulgaris*, *Euglena* sp., *Lynghya cryptovaginata*, *Phormidium tenue*, *Scytonema javanicum*, *Desmococcus olivaceus* and *Chlorococcum humicola* in the crust layer, but blue-green algae and filamentous species were the most abundant. In 0~50 mm and 50~100 mm depth diatoms and unicellular species dominated, namely *Hantzschia amphioxys*, *N. cryptocephala* and *Diatoma vulgare* var. *ovalis* often distributed in 0~50 mm depth, while *H. amphioxys* and *N. cryptocephala* in 50~100 mm ranges. In addition to all species that appeared in the lower layers they could be found in the upper ones as well. And the global distribution mechanism of algae in the arid and semi-arid environments was discussed as well.

The vertical distribution of algal biomass dramatically decreased with the soil depths from the surface to lower levels, and more than 99% biomass concentrated in the crust layer. Within crust 78% biomass distributed in 0.1 mm upper depth, 96% in the 1.0 mm upper depth. The reason was that there was not enough oxygen and light intensity for algae growth in below 1.0 mm depth.

Seasonal variance of species number in the crusts layers and 0~50 mm ranges was closely related to local precipitation, and the highest value occurred in the rain most abundance season (August), but it was basically stable in deeper layer (50~100 mm depth). This was attributed to rainwater seep. During the relative rainy season those species with small volume and easy motion were oozed down from the upper layers, and concentrated in the deeper layer. After their long-term metabolic activities the soil of deeper layer will be improved.

Key words: semi-desert; soil; algae; species composition; biomass; vertical distribution; seasonal variance; Shapotou

文章编号:1000-0933(2003)01-0038-07 中图分类号:S154.3 文献标识码:A

在干旱、半干旱地区,百分之七十以上的土壤表面覆盖着土壤结皮,而这层结构的存在对土壤保水、增肥、抗侵蚀及全球气候变化都有重要作用,因而已成为国内外越来越多研究者关注的热点问题之一^[1]。这种稳定结皮多是光合自养的先锋植物——藻类在土表生长繁殖所成,为此许多研究人员对结皮中藻类的种类组成、群落结构的变化规律等进行了广泛研究^[2~6]。但事实上,半荒漠环境中的土壤藻不仅仅分布在结皮层,它们也深入到土壤的相当深度^[7~9],而且这种分布也是极不均匀的^[10],它们的这种分布给异养微生物创造了多种生态位,从而影响土壤的结构,促进土壤的形成,推动整个生态系统的能量流动和物质循环。但荒漠、半荒漠环境中土壤藻的垂直分布问题至今没有任何系统报道,为此,本文对沙坡头地区半荒漠结皮、结皮下0~50 mm、50~100 mm、100~150 mm及150~500 mm深度藻类植物的种类组成、生物量变化进行了统计分析。

1 自然概况

样地位于宁夏回族自治区中卫县境内中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头科学实验站试验基地内——路北无灌溉人工植被区和路南灌溉区。其环境条件参见文献^[11]。

2 材料和方法

2.1 材料

在1997年5月到1998年10月期间,从沙坡头路北无灌溉人工植被区42龄、34龄、17龄、4龄围栏地、路南黄河灌溉区及流沙地每2月采样1次,每样点以蛇形线路选择10个1 m×1 m的小样方,每小样

方 8 等份,每次用小铲(酒精擦洗)取每小样方内 12 cm × 12 cm 的藻结皮(防压),采样器均匀取藻结皮下 0~50 mm, 50~100 mm, 100~150 mm 及 150~500 mm 沙样,每样点同层次混合后,尽快运回实验室。

2.2 方法

(1)生物量 培养计数法。(2)空间分布 将完整的结皮,先分切成 2 mm × 2 mm 的小块,然后每毫米分切,分别集、称重、培养、鉴定、计数,培养条件和计数方法同前^[11,12]。100 mm 以下深度没有检出任何藻类植物,没有进入统计之中。(3)数据处理 藻类植物的分布规律用系统聚类法;优势度用每克土中藻类个体总体积占藻类总体积的百分数表示。

3 结果

3.1 种类组成

3.1.1 结皮层 表 1 反映了该地区荒漠藻结皮中共有藻类植物 24 种,其中蓝藻 10 种,占 41.67% (丝状蓝藻占 70%);绿藻 5 种,占 20.83%,全为单细胞个体;硅藻 7 种,占 29.17%;裸藻 2 种,占 8.33%。将各样点藻种出现频率进行系统聚类分析,得到图 1,在 3.0 水平,24 个分类单位分为 7 个组, I 组是分布频率在 0.05~0.3 之间的稀有种,缢缩异极藻 (*Gomphonema constrictum*),集球藻 (*Palmellococcus miniatus*),集胞藻 (*Synechocystis pevalekii*),丝状念珠藻 (*Nostoc flagelliforme*),中型脆杆藻 (*Fragilaria intermedia*),附生色球藻 (*Chroococcus epiphyticus*),粘球藻一种 (*Gloecapsa* sp.),桥弯藻一种 (*Cyambella* sp.), II 组是频率在 0.775~1.0 之间的广普种,念珠藻一种 (*Nostoc* sp.),具鞘微鞘藻 (*Microcoleus vaginatus*),隐头舟形藻 (*Navicula cryptocephala*),双尖菱板藻 (*Hantzschia amphioxys*),小球藻 (*Chlorella vulgaris*),裸藻一种 (*Euglena* sp₁),隐鞘鞘丝藻 (*Lyngbya cryptovaginata*),纤细席藻 (*Phormidium tenue*),爪哇伪枝藻 (*Scytonema javanicum*),卵形鼓球藻 (*Desmococcus olivaceus*),土生绿球藻 (*Chlorococcum humicola*),这都为热带荒漠中常见种。其它组是分布频率在这两组之间的北方羽纹藻 (*Pinnularia borealis*),衣藻一种 (*Chlamomonas* sp.),裸藻一种 (*Euglena* sp₂),普通等片藻卵圆变种 (*D. vulgare* var. *ovalis*),固氮鱼腥藻 (*Anabaena azotica*) 单种成组。

3.1.2 结皮下 0~50 mm 表 1 显示结皮下 0~50 mm 深度有 15 种藻类植物,其中蓝藻占 40% (其中丝状蓝藻占蓝藻总数的 83.3%),绿藻占 20%,硅藻占 33.3%,裸藻占 6.67%。将该层次藻类据其出现频率进行聚类分析,结果见图 2A。在 3.5 水平,分 3 组, I 组是出现频率较高(0.675~0.825)的普生硅藻,双尖

表 1 藻类在各层次的分布

Table 1 Distribution of algae in the all layers

藻类 Algae	结皮层 Algal crusts		0~50 mm		50~100 mm	
	频率	Frequency	频率	频率	频率	频率
蓝藻门 ¹						
固氮鱼腥藻 ²	+	0.650	+	0.075		
附生色球藻 ³	+	0.050			+	0.010
粘球藻 ⁴	+	0.050				
隐鞘鞘丝藻 ⁵	+	1.000	+	0.050		
具鞘微鞘藻 ⁶	+	1.000	+	0.475	+	0.400
丝状念珠藻 ⁷	+	0.200	+	0.150		
念珠藻 ⁸	+	0.775				
纤细席藻 ⁹	+	1.000	+	0.225		
爪哇伪枝藻 ¹⁰	+	1.000				
集胞藻 ¹¹	+	0.175	+	0.175	+	0.175
绿藻门 ¹²						
衣藻 ¹³	+	0.475				
小球藻 ¹⁴	+	0.925	+	0.175	+	0.175
土生绿球藻 ¹⁵	+	1.000	+	0.325	+	0.225
集球藻 ¹⁶	+	0.300	+	0.300	+	0.025
卵圆鼓球藻 ¹⁷	+	1.000				
硅藻门 ¹⁸						
桥弯藻 ¹⁹	+	0.025				
普通等片藻卵圆变种 ²⁰	+	0.725	+	0.825	+	0.375
中型脆杆藻 ²¹	+	0.100	+	0.050		
缢缩异极藻 ²²	+	0.150				
双尖菱板藻 ²³	+	0.900	+	0.675	+	0.575
隐头舟形藻 ²⁴	+	0.900	+	0.825	+	0.625
北方羽纹藻 ²⁵	+	0.675	+	0.325		
裸藻门 ²⁶						
裸藻 ²⁷	+	0.975	+	0.375	+	0.225
裸藻 ²⁸	+	0.675				

① Cyanophyta (10), ② *Anabaena azotica*, ③ *Chroococcus epiphyticus*, ④ *Gloecapsa* sp., ⑤ *Lyngbya cryptovaginata*, ⑥ *Microcoleus vaginatus*, ⑦ *Nostoc flagelliforme*, ⑧ *Nostoc* sp., ⑨ *Phormidium tenue*, ⑩ *Scytonema javanicum*, ⑪ *Synechocystis pevalekii*, ⑫ Chlorophyta (5), ⑬ *Chlamydomonas* sp., ⑭ *Chlorella vulgaris*, ⑮ *Chlorococcum humicola*, ⑯ *Palmellococcus miniatus*, ⑰ *Desmococcus olivaceus*, ⑱ Bacillariophyta (7), ⑲ *Cyambella* sp., ⑳ *Diatoma vulgare* var. *ovalis*, ㉑ *Fragilaria intermedia*, ㉒ *Gomphonema constrictum*, ㉓ *Hantzschia amphioxys*, ㉔ *Navicula cryptocephala*, ㉕ *Pinnularia borealis*, ㉖ Euglenophyta (2), ㉗ *Euglena* sp₁, ㉘ *Euglena* sp₂.

菱板藻,隐头舟形藻和普通等片藻卵圆变种, I 组为出现频率在 0.475 的具鞘微鞘藻, II 组为出现频率在 0.05~0.375 之间的稀有种类,裸藻,北方羽纹藻,土生绿球藻,集球藻,小球藻,集胞藻,纤细席藻,中型脆杆藻,念珠藻,隐鞘鞘丝藻和固氮鱼腥藻。

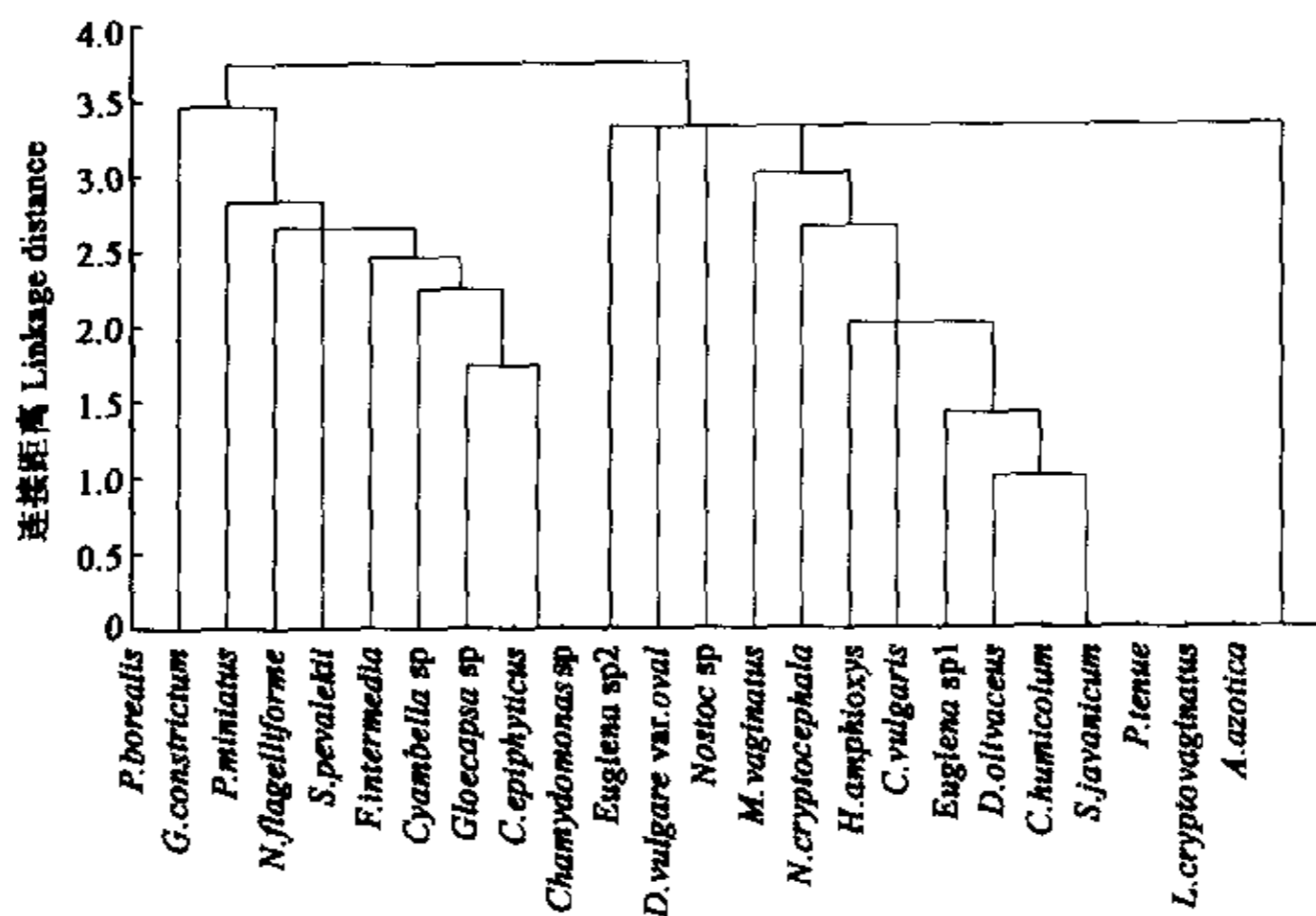


图 1 结皮层藻类分布的系统聚类图

Fig. 1 The system cluster dendrogram of the species distribution in the algal crusts

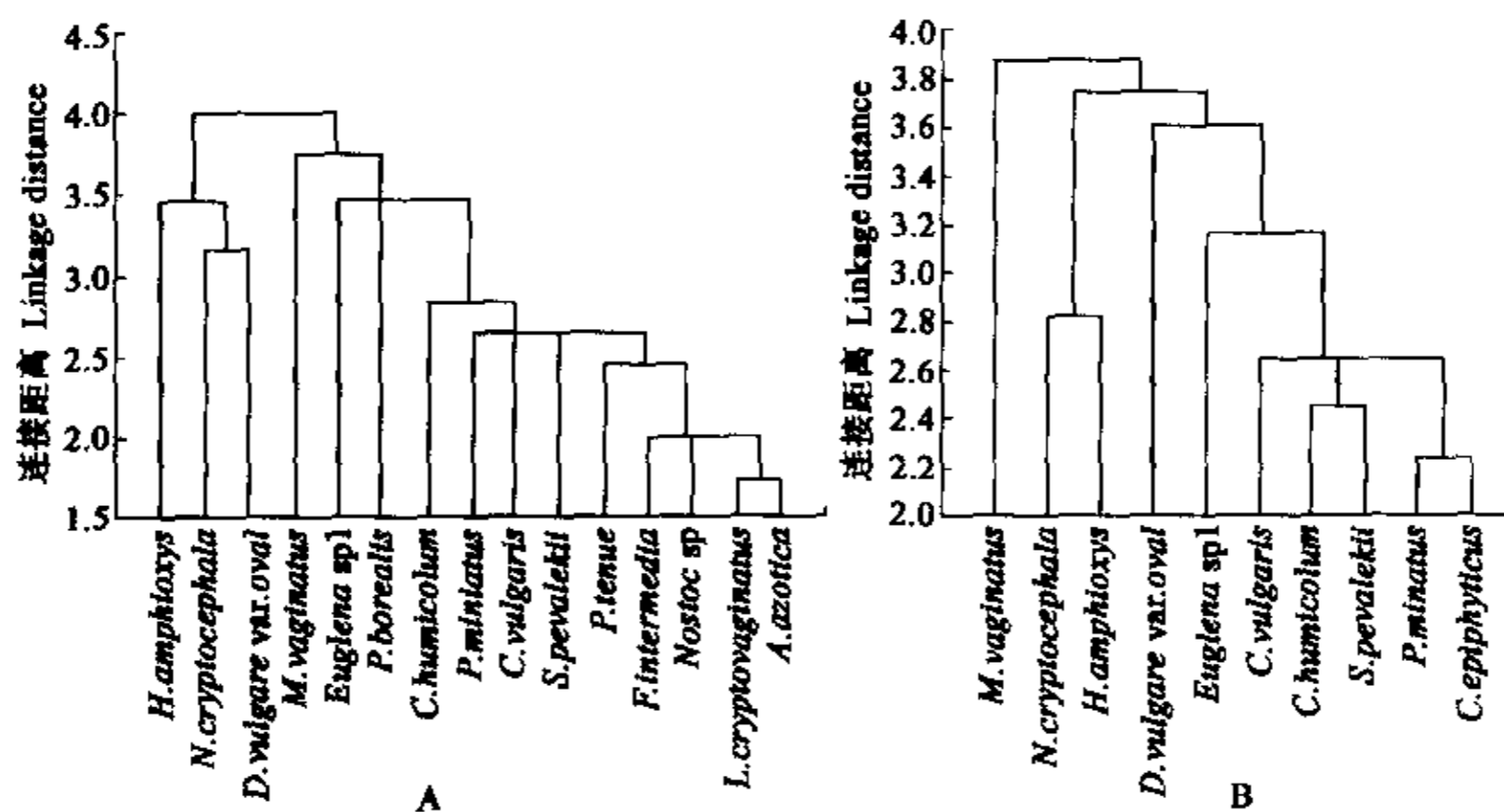


图 2 结皮下不同深度藻类分布的系统聚类图

Fig. 2 The system cluster dendrogram of the species distribution in the indifferent depths below the algal crusts

A 0~50 mm 深度 0~50 mm depth, B 50~100 mm 深度 50~100 mm depth

3.1.3 结皮下 50~100 mm 表 1 显示结皮下 50~100 mm 深度有 10 种藻类植物分布,其中蓝藻、绿藻、硅藻各 3 种,裸藻 1 种,其中 99% 为单细胞种类,而且它们在结皮层中都有分布,但在该层次多以孢子形式存在,只有培养条件下才能检出。聚类分析结果为图 2B,在 3.6 水平,可分为 3 组, I 组是出现频率为 0.4 的丝状蓝藻具鞘微鞘藻, II 组为出现频率在 0.575~0.625 的普生硅藻,隐头舟形藻和双尖菱板藻, III 组为出现频率在 0.025~0.375 之间的偶见种类,普通等片藻卵圆变种,裸藻,小球藻,土生绿球藻,集球藻,集胞藻及附生色球。

3.2 种类数的季节性变化

3.2.1 结皮层 图3A显示各样点在结皮层的种类数于后夏期(6月和8月)相对较多,秋季较少(10月),春季和冬季没有明显的下降和升高。

3.2.2 结皮下0~50 mm 结皮下0~50 mm深度,各样点种类数的季节性变化较结皮层明显,降水相对多的后夏期(6、8月份)种类数相对较多,冬季和春季普遍较少,但以12月份和4月份最少。

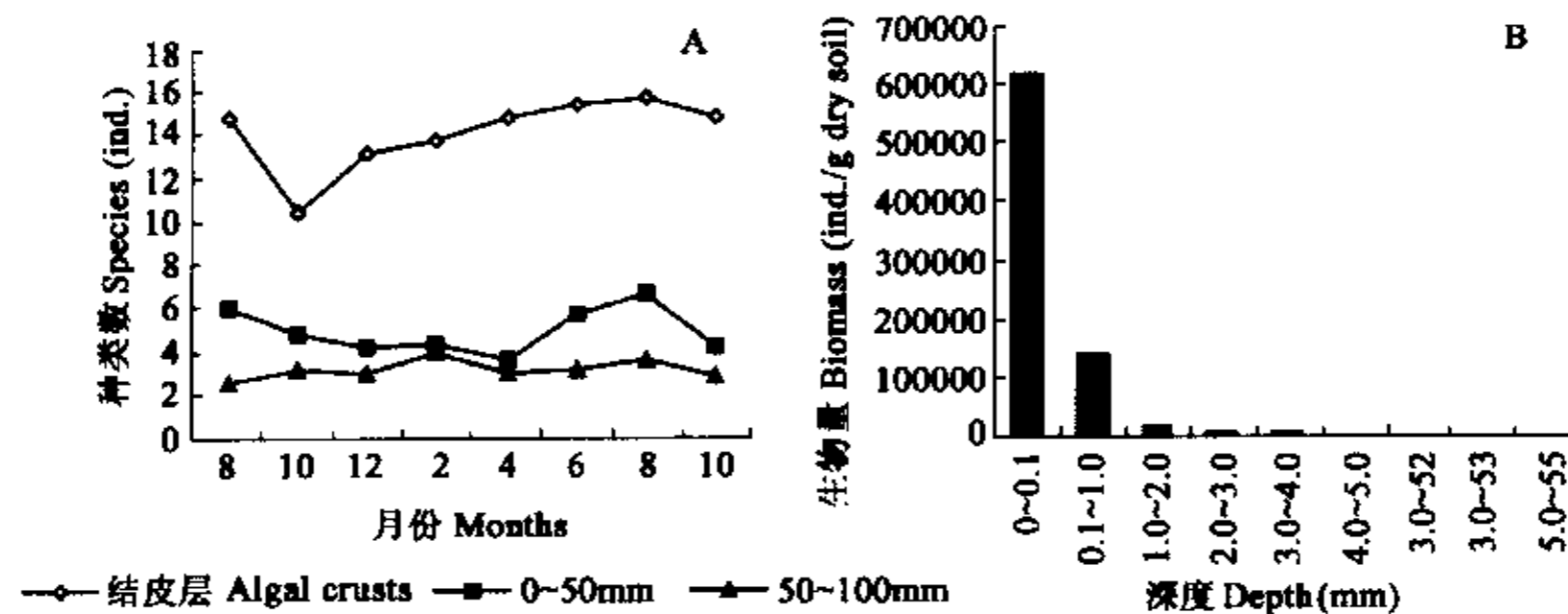


图3 结皮层、结皮下0~50 mm、50~100 mm深度种类数变化(A)和生物量在结皮层的垂直变化(B)

Fig. 3 Species change of algal crusts, 0~50 mm and 50~100 mm depths below the crusts (A) and vertical variance of biomass in crusts (B)

3.2.3 结皮下50~100 mm 在50~100 mm深度,各样点种类数变化幅度较结皮层和结皮下0~50 mm层次更微小,除2月份略有增加外,其它月份基本保持不变。

3.3 生物量的垂直分布

结皮层生物量(按平均厚度3 mm计算)一般在 $1.1 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^6$ 个/g干土,结皮下0~50 mm层次为 $1.1 \times 10^3 \sim 7.0 \times 10^4$ 个/g干土,结皮下50~100 mm为 $1.0 \times 10^2 \sim 7.0 \times 10^2$ 个/g干土。就结皮层,藻类生物量的垂直分布也非常不均(图3B),各样点从表到里锐减,其中78%的分布在0.1 mm以上的结皮层,96%左右的在1.0 mm以上的深度,而1.0 mm以下的深度不到结皮层总量的5%。

表2 不同深度藻类群落结构的变化

Table 2 Variance of community structure in different depths

	结皮层 Crusts		结皮下 Below the crusts 0~50 mm		结皮下 Below the crusts 50~100 mm	
	物种多样性 ^①	优势度 ^②	物种多样性	优势度	物种多样性	优势度
蓝藻 ^③	10	91.6	6	3.4	3	0.8
绿藻 ^④	5	5.2	3	5.6	3	2.8
硅藻 ^⑤	7	2.8	5	89.9	3	94.6
裸藻 ^⑥	2	0.4	1	1.1	1	1.8
丝状种类 ^⑦	7	90.6	5	6.3	1	2.8
单细胞及球形种类 ^⑧	17	9.4	10	93.7	9	97.2

① Species diversity, ② Dominant degree, ③ Blue-green algae, ④ Green algae, ⑤ Diatoms, ⑥ Euglenas, ⑦ Filamentous species, ⑧ Unicellular and coccoid species

3.4 群落结构垂直变化

3.4.1 物种多样性 表2显示不论蓝藻,绿藻,硅藻,还是裸藻,在结皮层都具有最大物种多样性,但以蓝藻比例最大。结皮下0~50 mm深度和50~100 mm深度多样性依次降低,但因0~50 mm层次的绿藻和裸藻多样性与50~100 mm层次相同,而后者多样性总数最小,所以从百分比来看,绿藻和裸藻在最深层次最多。丝状种类在结皮层比例最大,结皮下最深层次最小,相反,单细胞及球状种类在最深层次比例最大,结皮层最小。

3.4.2 优势度 表2反映结皮层中蓝藻具有最大优势度,达91.6%,其次为绿藻。结皮下0~50 mm硅藻

的优势度达 89.9%,为最丰富的类群,其次为绿藻;结皮下 50~100 mm 深度硅藻更丰富,优势度达 94.6%,随后的也是绿藻。丝状种类的优势度在结皮层最高,最深层最低,单细胞及球状种类则相反,在最深层最多,结皮层最少。

4 讨论

沙坡头属腾格里沙漠的边缘区域,其中藻类种类组成与世界范围内其它热沙漠(Sonoran 沙漠,Atacama 沙漠,Negev 沙漠,纳米比亚沙漠)相比,主要的优势植物——丝状蓝藻中没有颤藻(*Oscillatoria*),裂须藻(*Schizothrix*),织线藻(*Plectonema*)和眉藻(*Calothrix*)等,而有相对多的绿藻和硅藻。与极地的冷荒漠(Mawson Rock, Vestfold Hills, Davis Station, Dronning Maud Ld, McMurdo Dry Valleys 和 Edward VII Pen)相比,差异则更大,极地相对多样的微环境使其中藻类植物种类更丰富,群落结构更复杂,多数情况下绿藻种类数最多,而且有不少黄藻,而沙坡头地区尽管较其它沙漠有相对多的绿藻,但并未形成优势,且无任何黄藻^[13]。此外同一荒漠环境中的不同土壤微环境下种类组成也有较大差异,如沙坡头稻田土表中也有典型的淡水藻种水网藻(*Hydrodictyon*),刚毛藻(*Cladophora*)等^[11],因此世界范围内荒漠藻群落组成的差异仍然归结于大气候条件下的微环境差异。

结皮层与深层次群落结构的差异表现在结皮层分布最多的是丝状蓝藻,深层次主要是极其耐厌氧的、体积较小、随水分易运动的硅藻^[14],当然适应极端环境最先锋的屏障藻类是结皮层中的蓝藻,它们如何以生态位的精细变化来适应的机理已经有过详细报道^[10]。

关于 96%藻类生物量集中在表面 1 mm 深度问题,主要是浅层次有较丰富的氧气和阳光,便于自养微生物进行正常的同化代谢,因为土层中光强呈梯度锐减,据报道 1 mm 深度以下的藻类已得不到自身代谢所需的光强^[15]。

有关土壤藻分布的最大深度,Lukesova 发现它们在闲地中可以分布到地表下 52cm^[9],Metting 报道稻田土壤中一般到 30 cm^[14],刘永定等发现我国稻田中可以到 20 cm,并且从表及里呈富藻层-疏藻层-集藻层-稳定层-稀藻层规律变化^[7,8]。本研究发现该地土壤中仅 10 cm,而且灌溉区与非灌溉区及非灌溉区不同龄样点间都略有差异,灌溉区因黄河水灌溉造成的土壤板结和不透气,深层次分布的种类全为孢子形式的单细胞绿藻;非灌溉区则既有孢子形式存在的绿藻,也有营养体状态的绿藻、硅藻,此外在老龄结皮存在的土壤中,其纵向分布范围更广,在表层的集中程度略低些,而且这种分布与结皮的发育程度^[12]、演替、强度、土壤理化性质、土壤剖面差异都有明显的一致性(详细结果将在它稿发表)。因此稻田土壤中藻类的规律分布很可能与土地轮作有关,一般土壤中则与土壤的种类、质地、结构相关^[16~18],而在荒漠、半荒漠环境中,如果说藻结皮的存在固定了流沙的话,那么藻类在更深层次的分布才是其他原生生物生长繁殖、微生态系统形成、土壤改良、大生态环境逐步改善的必要条件。

结皮层藻类种类数变化,表现在降水较多的 8 月份相对较多,其它季节性变化并不明显,说明光照、营养、湿度等环境条件的季节变化对半荒漠土壤中藻类种类数没有明显影响,它们很可能已经完全适应了外界环境条件,或者它们的适应性变化表现在生物量方面,而不在种类数(这一问题将在下稿详细解答)。影响结皮下各层次种类数的主要因素是下渗水分的多少,藻体的运动性及耐厌氧性,结皮下 0~50 mm 深度的种类数在降水相对多的 8 月份种类数相应最多,降水少的 12 月份和 4 月份较少,因为此时结皮层中种类数也不多,加之正置冬、夏之初,季节变换之时,一些敏感种类或许暂时死亡,或许处于其它阶段,不易培养。结皮下 50~100 mm 层次种类数变化相对平稳,很可能是下渗到该层次的水分本身较少。至于 2 月份的轻度增加,很可能是内陆半荒漠地区冬季凌晨前的低温环境在土表形成较多冰霜,这些冰霜融化后产生的部分水分下渗时,那些小体积、易运动的藻体随水分也向深层运动所致,而且据测定,2 月份该层次平均地温较结皮层低 2~8°C,水分含量也较表层高 0.3%~1.8%。

因此,沙坡头地区荒漠土壤结皮层的广普种有念珠藻,具鞘微鞘藻,隐头舟形藻,小球藻,裸藻一种,隐鞘丝藻,纤细席藻,爪哇伪枝藻,卵圆鼓球藻,土生绿球藻;结皮下 0~50 mm 深度最常见的是硅藻双尖菱板藻,隐头舟形藻和普通等片藻卵圆变种;50~100 mm 深度出现频率最高的是双尖菱板藻和隐头舟形藻。

References

- [1] Yang X H, Zhang K B, Zhao Y J. Microbiotic soil crust-- a research forefront in desertificationprone area. *Acta Ecologica Sinica*. 2001, **21**(3): 474~480.
- [2] Liu Y D, Ley S H. On soil algae and their physiological ecology. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, **17** (3): 272~277.
- [3] Metting B. The systematic and ecology of soil algae. *The Bot. Rev.*, 1981, **47** (2): 195~312.
- [4] Hoffmann L. Algae of terrestrial habitats. *The Bot. Rev.*, 1989, **55**: 77~105.
- [5] Starks T L, Shubert L E, Trainor F R. Ecology of soil algae; a review. *Phycologia*, 1981, **21** (1): 65~80.
- [6] Zhou Z G, Chen Z J, Liu Z L. Study on the ecology of algae in surface crust of desert. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15** (4): 385~393.
- [7] Liu Y D, Li S H. Seasonal changes and vertical distribution of soil algae in several rice field of yellow brown earth in the Yangtzi River region. In: Lian, Z. Ed. *Proceedings of study on the resource, ecology, environment and economic development in Yangtzi River basin*. Beijing: Science Press, 1988. 266~269.
- [8] Yongding Liu and S. H Ley. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in rice field soil, Hubei, China. *Nova Hedwigia*, 1989, **48** (1~2): 55~67.
- [9] Lukesova A. Soil algae in four secondary successional stages on abandoned fields. *Algological Studies*, 1993, **71**: 81~102.
- [10] Hu C X, Liu Y D, Song L R, et al. Species composition and fine distribution of algae in semi-desert algal crusts. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2000, **11** (1): 61~65.
- [11] Hu C X, Liu Y D, Song L R. Species composition and distribution of algae in Shapotou area, Ningxia Hui Autonomous region, China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23** (5): 443~448.
- [12] Hu C X, Liu Y D, Huang Z B, et al. The fine structure and development of algal crusts in desert area. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24** (1): 11~18.
- [13] Wynn-Williams D D. *Cyanobacteria in desert- life at the limit?* In Whitton, Potts M. ed. *The ecology of cyanobacteria; their diversity in time and space*. Kluwer Academic publishers, Dordrecht, Netherlands, 2000. 341~366.
- [14] Moss B. Adaptations of epilimnetic and epipsammic freshwater algae. *Oecologia*, 1977, **28**: 103~108.
- [15] Carcia-Pichel F and J Belnap. Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts. *J. Phycol.*, 1996, **32**: 774~782.
- [16] Liu Y D, Shen Y W, Song L R, et al. Species composition of algae and the relationship with fertility of soils in the middle reach of Yellow River, China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23** (5): 434~442.
- [17] Yongding Liu, Yinwu Shen, Lirong Song, et al. Species composition and distribution of blue-green algae from soil in the middle reach of Yellow River, China. Proceeding of intertional conference on Asian Network on microbial researches, 1998. 395~401.
- [18] Bongale U D. Distribution of *Nostoc* and *Anabaena* (Cyanophyta) in relation to soil propertiel in the cultivated soils of Karnataka state (India). *Cryptogamie/Algologie*, 1987, **8** (1): 13~18.

参考文献

- [1] 杨晓晖,张克斌,赵云杰.生物土壤结皮——荒漠化地区研究的热点问题.生态学报,2001,21(3):474~480.
- [2] 刘永定,黎尚豪.土壤藻及其生理生态.水生生物学报,1993,17(3):272~277.
- [6] 周志刚,程子俊,刘志礼.沙漠强皮中藻类生态的研究.生态学报,1995,15(4):385~393.
- [7] 刘永定,黎尚豪.长江中游黄棕壤地区几种稻田土壤的蓝藻种类及田间季节差异与垂直分布.见:廉正编.长江流域资源、生态、环境与经济开发研究论文集.北京:科学出版社,1988.266~269.
- [10] 胡春香,刘永定,宋立荣,等.半荒漠藻结皮中藻类的种类组成和分布.应用生态学报,2000,11(1):61~65.
- [11] 春春香,刘永定,宋立荣.宁夏沙坡头地区的藻类植物及其分布.水生生物学报,1999,23(5):443~448.
- [12] 胡春香,刘永定,黄泽波,等.荒漠藻壳的精细结构与发育.水生生物学报,2000,24(1):11~18.
- [16] 刘永定,沈银武,宋立荣,等.黄河中游土壤类的种类组成与土壤肥力的关系.水生生物学报,1999,23(5):434~442.