

土壤藻生物量及其在荒漠结皮的影响因子

胡春香^{1,2}, 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:土壤藻生物量方法方面的不统一和操作性误差已长时间影响着土壤藻的研究进展。以沙坡头不同龄荒漠土壤为样点, 通过直接计数、培养计数、体积换算等方法的比较分析, 提出了土壤藻生物量相对规范的测定和计量方法——体积法; 测定当地无灌溉人工区结皮中生物量为 $5.99 \sim 8.58 \text{ mm}^3/\text{g dry soil}$, 灌溉区 $1.28 \text{ mm}^3/\text{g dry soil}$, 最高值出现在 8 月份, 最低值出现在 2 月份; 与当地小气候、土壤理化性质等 33 项环境因子逐步回归显示, 它们与当地降水量、土壤中总钾、水解氮、 Fe^{3+} 、粗粘粒含量显著正相关, 与土壤 pH、有机质、Cu、Zn 含量显著负相关, 同时受土壤中 Co 含量的影响。

关键词:荒漠结皮; 藻类生物量; 方法; 季节性变化; 环境因子

Soil algal biomass and its influential factors in desert soil crusts

HU Chun-Xiang^{1,2}, LIU Yong-Ding^{2*} (1. College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 284~291.

Abstract: Biomass measuring techniques of soil algae have long been not uniform and have serious practical errors in each. This has severely retarded the research development of this region. In this study, we collected desert algal crusts of different developmental stages (42, 34, 17, 8, 4 aged) and topsoil of unconsolidated sand located in Shapotou, Zhongwei County, in Ningxia Autonomous Region. We conducted direct counts by using acridine orange and 4,6-diamidino-2-phenylindole dyes under fluorescence microscope; dilution plate techniques by a series of dilution gradients incubated on BBM, BG11, BHB-D1 and Chu'10 agar culture media; biovolume method by translation of both direct counts and plate counts results into volume for each species of algae. By comparison we put forward a relative standard method to quantified algal biomass in species level, namely biovolume techniques.

The detailed biovolume technique is: (1) Sampling should be much finer in depths. Normally the vertical samplings are done at serial sections of 0~5, 5~15, 15~50, 50~150, 150~200mm in depth respectively. In the laboratory, sections of those blocks were firstly scraped clean with a sterile scalpel, then cut into 0~1, 1~2, 2~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~25, 25~50, 50~100, 100~150 and 150~

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资助项目(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:2001-09-18; **修订日期:**2002-04-10

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。Email: deluzh@public.lz.gs.cn

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

Foundation item: Supported by the Key Project of Chinese Academy of Sciences (KZ952-51-207); the National Natural Science Foundation of China (No. 30070154, No. 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: 2001-09-18; **Accepted date:** 2002-04-10

Biography: HU Chun-Xiang, Doctor, Associate Professor. Main research areas include the soil algae. E-mail: deluzh@public.lz.gs.cn

200 mm blocks, whereas clay kinds soil into 0~5, 5~15, 15~50, 50~150, 150~200 mm blocks. (2) Samples should be ground, diluted, shook and dispersed as possibly as it can before culture; (3) The average volume of each species was measured by direct observation (species can be identified without culture) and solid culture observation (species can be identified only under culture condition); (4) Many kinds of culture media and 3~4 replications should be used for each media; (5) Natural community structure and percentage of dominant species should be determined under direct observation; (6) Volume calculation should include both natural and culture community structure. Biomass was expressed as volume per gram dry soil.

According to this method the average biovolume was $5.99 \sim 8.58 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ dry soil in the algal crusts of non-irrigation area of Shapotou, and $1.28 \text{ mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ dry soil in irrigation area. The maximal biovolume was exhibited in August with the highest precipitation; the minimal value in February with the lowest air temperature. Additionally 6 microclimates factors (wind speed, air and surface temperature, evaporation, precipitation and humidity) and 27 soil microenvironment parameters (total N, P, K, rapidly available N, P, K, C/N, organic matter, moisture, pH, electric conductivity, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , Mn, V, Zn, Cu, Fe, Co, coarse sand grains, fine sand grains, coarse silt, fine silt and coarse clay particles) associated with biovolume were considered. Stepwise multiple regression indicated that biovolume was positively correlated with the amount of local precipitation, total K_2O , soil hydrolyzable nitrogen, Fe^{3+} and coarse silt, while negatively correlated with pH, organic matter, Cu and Zn. Meanwhile it was affected by trace element Co. This regression results were compared with other associated research as well.

Key words: desert soil; algal biovolume; method; seasonal change; influential factors

文章编号:1000-0933(2003)02-0284-08 中图分类号:Q142, S154.3 文献标识码:A

荒漠结皮的恢复已成为目前荒漠化治理中的热点问题之一^[1~3],其中最重要的形成生物——藻类生物量的准确确定及其影响因子的研究显得更为重要。但长期以来土壤藻生物量由于计数方法的不同(直接计数和培养计数)、加富培养条件的差异(培养基种类和数量)、样品处理方法(研磨与否,研磨程度,稀释倍数,分散程度等)及基本定量单位(每克干土或单位面积中细胞数,个体数或体积)的不统一,各人报告结果间没有可比性^[4~6],加之各研究所选择环境因子的局限性,或结皮发育程度的变化,报告结果有较大差异^[7~9]。为此,本文选用直接计数、培养计数、体积换算等方法对比考察了荒漠藻类生物量,并选择了包括当地微气候、土壤养分、盐分、矿质、质地在内的33项环境指标,分析了它们对沙坡头地区4、8、17、34、42龄结皮中荒漠藻生长繁殖的影响,这一研究结果将不仅对土壤藻生物量研究提供比较准确规范实验方法,而且对人工结皮的快速恢复及生长预测都有重要指导意义。

1 自然概况

沙坡头位于宁夏回族自治区中卫县境内,腾格里沙漠东南缘($\text{N}37^{\circ}27'$, $\text{E}104^{\circ}57'$),海拔1200m,具干燥、多风的荒漠和半荒漠气候特征,详细概况见前文^[9]。

2 材料和方法

2.1 材料

从1997年8月到1998年10月,以沙坡头路北无灌溉人工植被区1956年(56样点),1964年(64样点),1981年(81样点),1994年(94样点)围栏地,流沙(Ss 样点)地及路南灌溉区林地(1990年翻新土表的 Tr 样点)为研究样点,每2月采样一次,采样方式同文献^[9]。

2.2 方法

2.2.1 生物量 (1)直接计数法 将样品研磨过筛(0.1mm),加少量无菌蒸馏水,轻微震荡0.5~1.0h,再稀释100或1000倍,加吖啶橙或DAPI(4,6-diamidino-2-phenylindole)染色、计数。

(2)培养计数法 将上述稀释了100或1000倍的研磨样品,立即接种于BBM, BG11, HB-D1和朱氏

10 号固体培养基(脱毒日本琼脂粉, 1.2%), parafilm 封口、倒置, 每稀释度在每种培养基设 4 个重复, 一半培养皿保存在 $30 \pm 1^\circ\text{C}$, $70 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$, 另一半在 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $70 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 条件, 于 15d 和 30d 后两次计数。

(3) 体积法 对蓝藻和硅藻, 从一定稀释样品中测定每藻种 50~100 个个体的平均体积; 对绿藻则测定其培养后个体的平均体积, 然后将直接计数所得丝状蓝藻和培养计数所得绿藻、硅藻换算成体积, 并相加获得每克干土中藻类的体积生物量。

2.2.2 结皮土壤理化分析 土壤理化性质由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所测试中心测定, 全采用土壤常规分析法。其中粗径沙砾 4~1.0mm, 粗沙粒 1~0.25mm, 细沙粒 0.25~0.05mm, 粗粉粒 0.05~0.01mm, 细粉粒 0.01~0.005mm, 粗粘粒 0.005~0.001mm。

2.2.3 气象资料 所有气象数据来自沙坡头科学试验站路北气象观测站。

2.2.4 数据处理 藻类生物量与环境因子的关系用逐步回归法(Statistica 5.97 版)。

3 结果与讨论

3.1 生物量的季节性变化

从图 1 看出各计数方法所得结果的最高值都出现在 8 月份, 最低值在 2 月份。各样点间相比, 直接计数中 64 样点最高, 林地最低, 其它样点依次为 56, 94, 81, 但 94 样点在 6、8 月更高, 这与该样点位于丘间低地的低风速、高营养、多水分等相对优越的地理环境密切相关^[9]。培养计数中, 也是 64 样点最高, 林地样点最低, 但其它样点依次为 56, 81, 94, 而且都在 12 月有小幅增加, 这可能与该月地表较多冰霜水分有关, 至于为什么这一现象只出现在培养计数, 可能与以下误差有关。图 1 也反映同一样品直接计数结果高培养计数 16%~48%, 主要原因是蓝藻, 特别是优势种——具鞘微鞘藻 (*Microcoleus vaginatus*)^[9] 培养计数的结果仅为直接计

表 1 本实验中藻种平均体积

Table 1 Average volume of different species of algae measured in this experiment

种类 Taxa	体积 Volume ($\mu\text{m}^3 \cdot \text{indiv}^{-1}$)
固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>	523
隐鞘丝藻 <i>Lyngbya cryptovaginata</i>	16957
念珠藻一种 <i>Nostoc</i> sp.	1289
具鞘微鞘藻 <i>Microcoleus vaginatus</i>	6428
纤细席藻 <i>Phormidium tenue</i>	271
爪哇伪枝藻 <i>Scytonema javanicum</i>	32429
集胞藻 <i>Synechocystis pevalekii</i>	8
衣藻一种 <i>Chlamydomonas</i> sp.	188
卵圆鼓球藻 <i>Desmococcus olivaceus</i>	4186
土生绿球藻 <i>Chlorococcum humicola</i>	1436
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	260
集球藻 <i>Palmellococcus miniatus</i>	34
隐头舟形藻 <i>Navicula cryptocephala</i>	328
普通等片藻卵圆变种 <i>Diatoma vulgare</i> var. <i>ovalis</i>	438
双尖菱板藻 <i>Hantzschia amphioxys</i>	1309

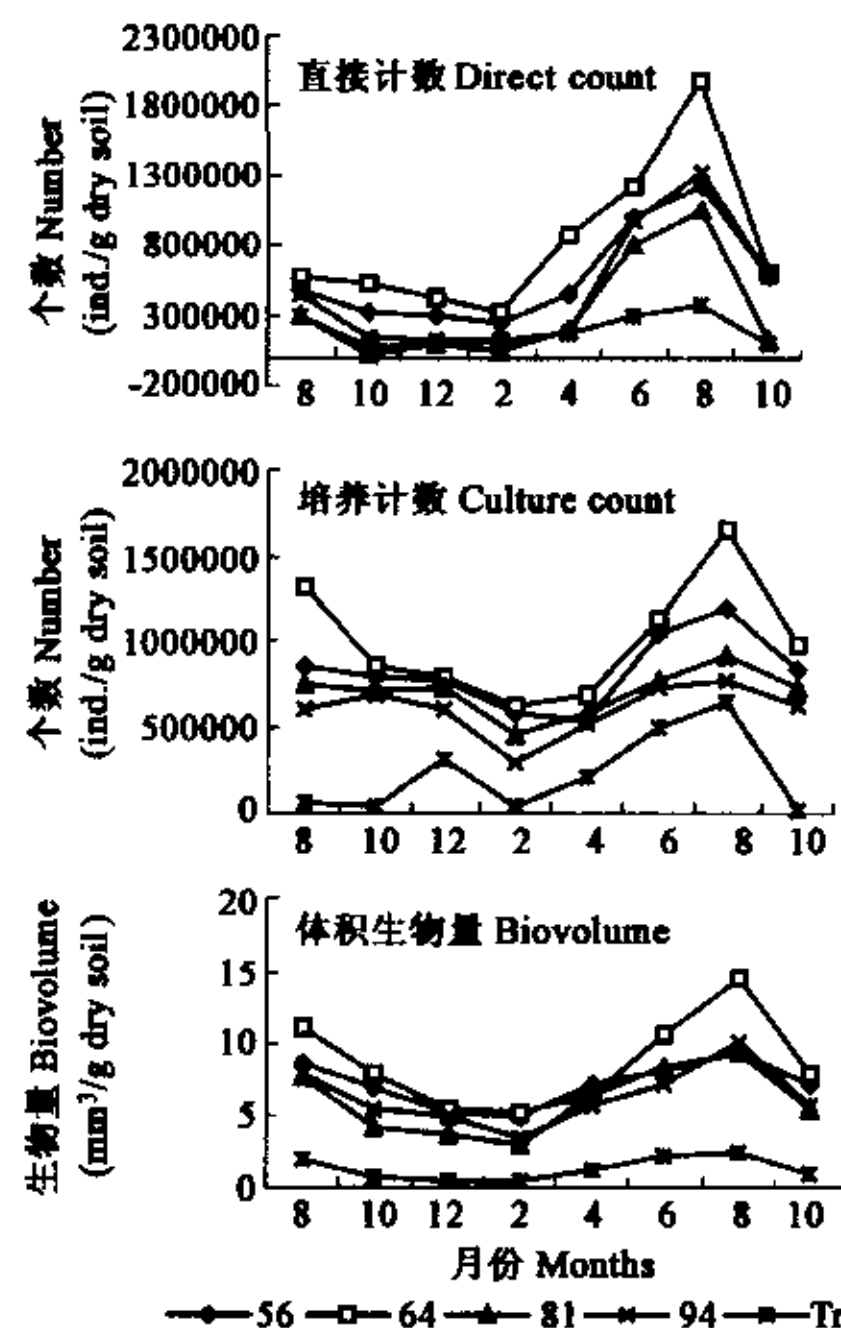


图 1 结皮中藻类生物量的季节性变化

Fig. 1 Seasonal change of algal biomass in the algal crusts

数的 68%~76%, 而单细胞绿藻和硅藻培养计数结果分别高直接计数 78%~86% 和 6%~11%, 因为直接计数时多数绿藻和硅藻因体积小、数量少、不宜鉴定而易被遗漏; 而在多种培养基的培养条件下, 直接计数中被遗漏的绿藻、硅藻均被发现, 但丝状蓝藻又因为经常粘连在一起, 特别是具鞘微鞘藻常 2~10 根藻丝包被在一个胶质鞘中, 或几十个个体粘在一起, 最终在培养基上形成一个藻落, 因此丝状蓝藻的数量被降低了几倍、甚至数十倍, 这也是直接计数

与培养计数中 81 样点与 94 样点排序不一致的原因(94 样点中具鞘微鞘藻高 81 样点 3.4%)。此外个体体积差异也是造成数量生物量不准确的另一根源,从表 1 不难发现优势种与稀有种之间的个体体积之差达 20~800 倍,在这种情况下,如果按个体数计算,仅优势种方面将产生几百倍、甚至几千倍的误差。因此,在直接计数结果基础上再加只有培养才能鉴定种属的培养数量,并将其换算成体积时才更为精确,而且这是解决长期滞留的荒漠藻群落结构原生演替,土壤改良、固定能力准确测定所必需的。

各封育样点间生物量的差异与封育时间及他们所处的演化发育程度有关,初期,生物量增长较快,后期速度放慢,再后期由于其它隐花植物的生长开始下降。

在土壤藻生物量研究方面,长期以来由于表示方式的混乱和采样层次的不统一,各研究结果间可比性很差。如 Metting 和 Rayburn 对林地土表以细胞数 $\cdot g^{-1}$ ^[10],King 和 Ward 对受扰土和未受扰土土表以细胞数 $\cdot g^{-1}$ ^[11],Hunt 和 Floyd 对闲地、林地 1~2cm 土表以细胞数 $\cdot g^{-1}$ ^[12],Reyanud 对稻田、闲地、沙丘 1cm 以上深度以藻类细胞数 $\cdot cm^{-2}$ ^[13],Shimmer 和 Darley 对耕地 1~2cm 深度以个体数 $\cdot m^{-2}$ ^[14],Lukesova 对闲地、草地和林地的每 2cm 深度及酸雨影响土壤的 0~1cm 深度以细胞数 $\cdot g^{-1}$ ^[15],Quesada 和 Fernandez-Valiente 对稻田土壤以细胞数/CFU ml⁻¹水^[16],洪英等对不定厚度荒漠土表以叶绿素 $\cdot g^{-1}$ ^[17],周志刚等对荒漠土表结皮以细胞数 $\cdot g^{-1}$ 表示^[18]。而事实上,土壤藻常以毫米、甚至微米级的精細层次分布在土壤的不同深度,微米间存在千倍以上的差异^[9,19]。另一问题是计数前对土样的处理各不相同,以上研究中除周志刚和 Hunt 和 Floyd 等外,其他计数样品都未经研磨、过筛。

表 2 各样地藻类覆盖及土壤质地

Table 2 Coverage of moss and soil texture in all sites

样点 Sites	藻类覆盖度(%) Coverage of moss	粗沙砾 Coarse gravel	粗沙粒 Coarse sand grain	细沙粒 Fine sand grain	粗粉沙 Coarse silt	细粉沙 Fine silt	粗粘粒 Coarse
56	30~40	0	0.942	75.278	19.830	1.717	2.228
64	0~25	0	0.918	77.278	16.185	1.100	1.747
81	0~5	0	3.525	80.59	13.378	1.137	1.357
94	0~2	0	1.647	83.843	12.028	0.732	1.730
Tr	90~100	3.433	3.735	63.353	22.738	3.078	3.635
Ss	0	0	4.788	94.983	0	0	0

3.2 影响生物量的主要环境因子

选择了包括气候(风力,降水量,蒸发量,地表温,气温,空气湿度)、营养(总氮,水解氮,总磷,速效磷,总钾,速效钾,C/N 比,有机质)、pH、土壤水分、离子(EC , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^-)、微量元素(V, Co, Fe, Mn, Cu, Zn)及土壤质地(粗径沙砾、粗沙粒、细沙粒、粗粉粒、细粉粒、粗粘粒)在内的 33 项环境指标(图 2,图 3 和表 2),逐步回归显示,生物量与降水量、总钾、水解氮、Fe、粗粘粒含量显著正相关,与土壤 pH、有机质、Cu、Zn 含量显著负相关,同时还受土壤中 Co 含量的影响(表 3),回归方程为:生物量 $=0.391$ 降水量 $+0.586$ 水解氮 -0.3 有机质 $+0.399$ 总钾 -0.19 pH -0.74 Cu -1.2 Zn $+0.214$ Co $+1.47$ Fe $^{3+}+0.385$ 粗粘粒 $(*$ 为显著相关)。

在干旱的荒漠环境中,水分和风力是藻类殖生的首要限制因子,但在已经形成的稳定藻结皮中,风力不再是主要威胁,而水分限制显得更加重要,因此降水量与生物量显著正相关;氮肥贫乏是贫瘠沙土中植物生长缓慢的主要原因之一,水解氮与生物量显著正相关与此规律一致;钾是生命大分子物质合成、运转所必需的,但在干旱的极端环境中其增加原生质水合度、增强植物抗旱的作用更为重要;Fe 是植物体叶绿素构造、合成及许多酶(特别是电子传递链中酶)的辅基,通过 Fe³⁺ 与 Fe²⁺ 间氧化还原反应参与呼吸、光合、固氮等重要代谢过程,在干旱的荒漠环境,藻类植物常以快速打开和关闭其代谢过程为适应策略,能量消耗非常大,回归结果也显示在 33 项环境因子中 Fe³⁺ 与生物量的正相关最显著;由伊利石、绿泥石、高岭土等组成的粗粘粒,有丰富的营养和吸收性能,可通过影响土壤质地改善土壤的通透性^[9];Co 是藻类生长必

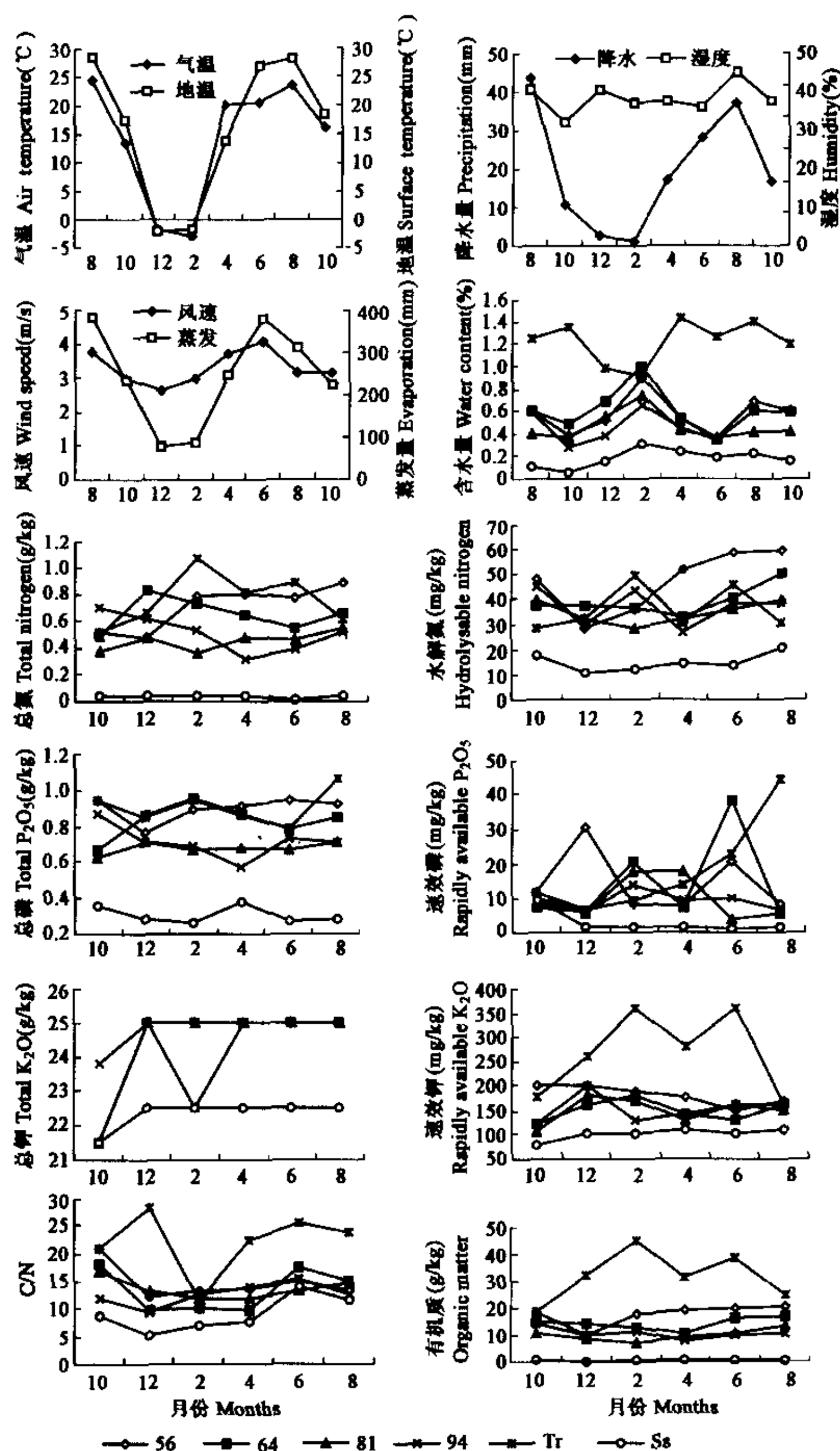


图2 各样点(56,64,81,94,Tr,Ss)气候及营养因素的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of climate and nutrition factors in sampling sites(56,64,81,94,Tr,Ss)

需的微量元素,因而也呈正相关。有机质含量的负效应,很可能与地衣、菌类、藓类、原生动物等比例增大及其竞争、捕食有关;蓝藻尽管耐高 pH,但高 pH 一般对藻类生长不利,而且这种不利影响总与离子强度相伴发生,加之干旱区过量蒸发而积累的高盐度使 pH 的负效应更明显;Cu、Zn 是植物代谢过程中许多酶的辅基和组成部分,但只在一定浓度范围内起作用,过量后,不仅没有正常的正效应,反而有毒害作用。

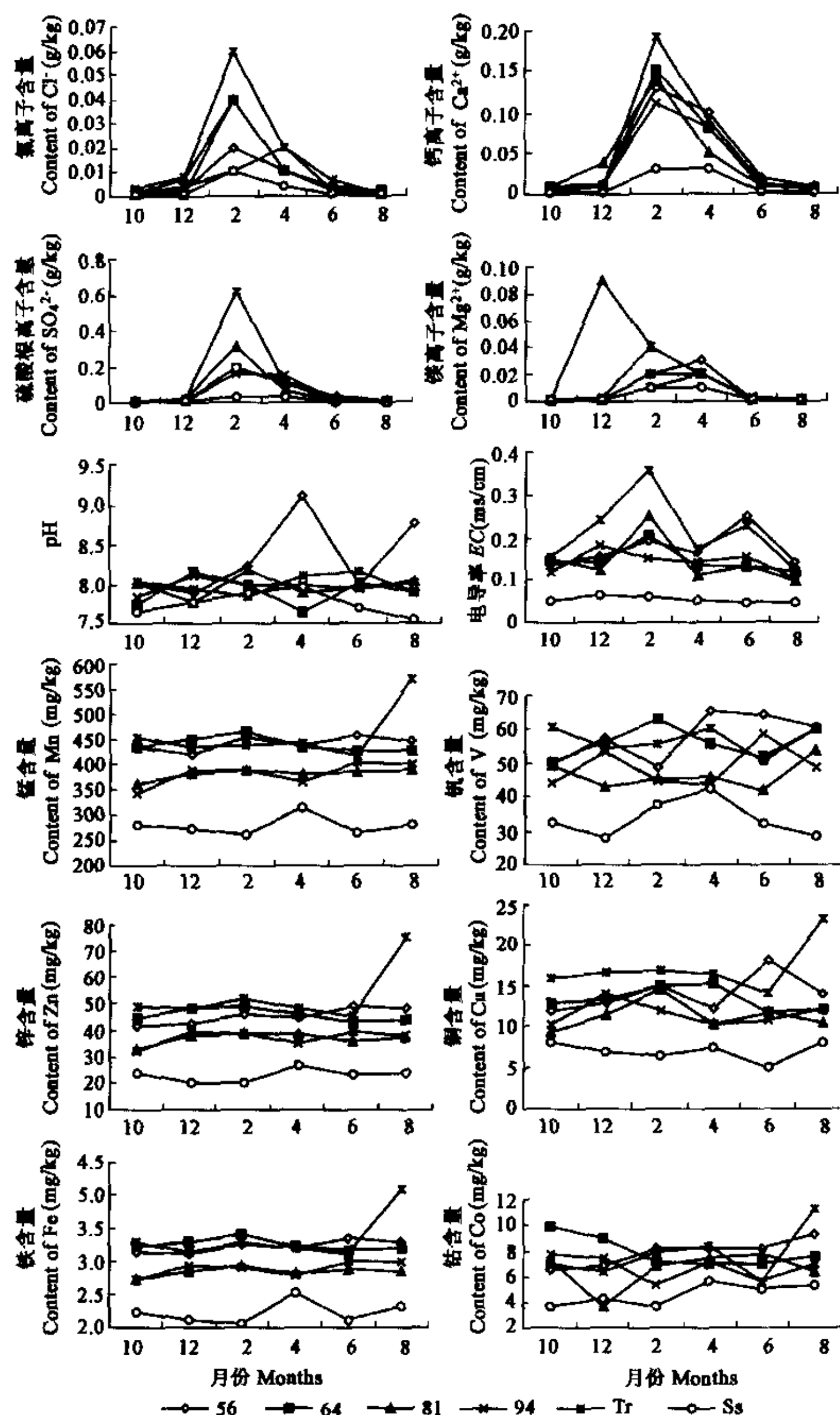


图3 各样点(56,64,81,94,Tr,Ss)离子及微量元素的季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of ion and trace elements in the sampling sites(56,64,81,94,Tr,Ss)

在相关研究中,最密切的是 5a 前周志刚等对该地藻类生物量影响因子的研究,他们的逐步回归显示只有水溶性 Mg 和降雨量对生物量有显著影响,因为(1)排除了土壤质地及许多其他环境因子;(2)只分析了某一发育阶段的结皮,且没有流沙样;(3)气象数据为中卫县资料;(4)生物量以细胞数/g 干土表示^[18]。其他报道中生物量随降水量不同而不同,与土壤 pH、有机质负相关,受土壤营养水平、土壤质地显著影响的规律与本研究基本相似,但光强、土壤温度、湿度、交换性钠、硫酸盐、Ca、Mg、EC、C/N、S、Mn 等因素的

影响各不相同^[2,5,6,11~14],甚至南极龟裂土中藻类生物量根本不受任何环境因子的影响^[20]。可能的原因有两方面:一是不同环境中影响生物量的因素的确互不相同,二是某些研究选择的有限环境指标简化了因子间的交互效用,或将最重要的因子排除在外,特别是那些将土壤质地排除在外的分析。

表 3 生物量与环境因子回归结果

Table 3 Regression results of biomass and environmental factors

因子 Factors		系数 Coefficient	p-level	常数 Constant		p-level	R ²
				B	p		
气候 Climate	降水量 Precipitation	0.391 *	0.0060	2.984	0.0007	0.0060	0.1347
	水解氮 Hydrolyzable N	0.586 *	0.0002	-22.649	0.0356	0.0000	0.8235
土壤理化	有机质 Organic matter	-0.30 *	0.0378				
Soil physico-chemistry	总钾 (K ₂ O) Total K ₂ O	0.399 *	0.0002				
	pH	-0.19 *	0.0366				
	Cu	-0.74 *	0.0023				
	Zn	-1.20 *	0.0285				
	Co	0.214	0.0944				
	Fe ³⁺	1.47 *	0.0045				
	粗粘粒 Coarse silt	0.385 *	0.0080				

* 显著相关 Significant correlation

4 结论

利用体积法进行土壤藻生物量的测定,操作应注意:(1)采样层次要明确化,精细化。一般土壤以 0~5, 5~15, 15~50, 50~150, 150~200mm 的层次采集,荒漠土壤可按结皮层,结皮下不同深度采集,入实验室后再分成 0~1, 1~2, 2~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~25, 25~50, 50~100, 100~150, 150~200mm 层次,而粘土类土壤可按 0~5, 5~15, 15~50, 50~150, 150~200mm 层次分析^[9,19,21]; (2)室内分析时严把取样的均匀性、代表性; (3)培养前,对土样要进行适度研磨、稀释、震荡、分散; (4)通过直接观察和培养观察测定不同个体的平均体积; (5)从直接观察确定自然群落结构、优势种比例; (6)对于长期处于代谢休眠期的荒漠藻,在进行荧光染色前可将样品先在水中浸润 0.5~1.0h。 (7)使用适宜于多藻种生长的多种培养基,或适合多藻种生长的培养基,并且每种培养基要有 3~4 个以上的重复; (8)体积换算既要考虑藻类自然群落结构,也要考虑加富培养后的群落组成,并以单位重量土壤中体积数表示为好。

References

- [1] Evans R D and Johansen J R. Microbiotic crusts and ecosystem processes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, 18 (2): 183~225.
- [2] Johansen J R. Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America. *J. Phycol.*, 1993, 29: 140~147.
- [3] Yang X H, Zhang K B, Zhao Y J. Microbiotic soil crust—a research forefront in desertification prone area. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (3): 474~480.
- [4] Liu Y D, Ley S H. On soil algae and their physiological ecology. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, 17(3): 272~277.
- [5] Metting B. The systematic and ecology of soil algae. *The Bot. Rev.*, 1981, 47 (2): 195~312.
- [6] Starks T L, Shubert L E and Trainor F R. Ecology of soil algae; a review. *Phycologia*, 1981, 21(1): 65~80.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] Metting B and Rayburn W. Algal communities and soil microenvironments in an eastern Washington silt loam. *Soil Science*, 1979, **127**: 74~78.
- [11] King J M and Ward C H. Distribution of edaphic algae as related to land usage. *Phycologia*, 1977, **16** (1): 23~30.
- [12] Hunt M E and Floyd H. Soil algae in field and forest environments. *Ecology*, 1979, **60** (2): 362~375.
- [13] Reynaud P A. Ecology of nitrogen-fixing cyanobacteria in dry tropical habitats of West Africa: A multivariate analysis. *Plant and Soil*, 1987, **98**: 203~220.
- [14] Shimmer S M and Darley W M. Productivity and density of soil algae in an agricultural system. *Ecology*, 1985, **66** (5): 1439~1447.
- [15] Lukesova A. Soil algae in four secondary successional stages on abandoned fields. *Algological Studies*, 1993, **71**: 81~102.
- [16] Quesada A and E. Fernandez-Valiente. Relationship between abundance of N₂-fixing cyanobacteria and environmental features of spanish rice fields. *Microb. Ecol.*, 1996, **32**: 59~71.
- [17] Hong Y, Li Y Y, Li S H. Preliminary study on the blue-green algae community of arid soil in Qaidam basin. *Acta Botanica Sinica*, 1992, **34**(3): 161~168.
- [18] 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.
- [19] Liu Y D and Ley S H. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in ricefield soil, Hubei, China. *Nova Hedwigia*, 1989, **48** (1~2): 55~67.
- [20] Davey M C and Rothery P. Primary colonization by microalgae in relation to spatial variation in edaphic factors on Antarctic fellfield soils. *J. Ecol.*, 1993, **81**: 335~343.
- [21] Liu Y D, Song L R, Shen Y W, et al. Potential of terrestrial microalgae and cyanobacteria in environmental technology. In Kojima H and Lee Y K, ed. *Photosynthetic microorganisms in environmental biotechnology*. Hong Kong: Springer-verlag Hong Kong Ltd, 2001. 195~216.

参考文献

- [3] 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.
- [4] 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.
- [7] 胡春香, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [17] 洪英, 李尧英, 黎尚豪. 柴达木盆地荒漠土壤蓝藻群落的初步研究. *植物学报*, 1992, **34** (3): 161~168.
- [18] 周志刚, 程子俊, 刘志礼. 沙漠结皮中藻类生态的研究. *生态学报*, 1995, **15**(4): 385~393.