

荒漠藻壳的精细结构与发育

胡春香^{1,2)} 刘永定^{1)*} 黄泽波¹⁾ 宋立荣¹⁾

1) (中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

2) (西北师范大学生物系, 兰州 730070)

摘要 以宁夏沙坡头不同时期围栏形成的固沙地为样点, 将土壤学研究手段与土壤微生物学研究方法相结合, 首次在微米层次揭示了荒漠藻壳中藻类植物的自然群落结构和空间分布规律, 同时结合矿物物相分析, 藻类生物量、土壤理化性质, 从生物学、土壤学、矿物学交叉结合的角度深入地揭示了荒漠藻壳的结构和发育, 为荒漠拓殖生物群落的发育和人工调控荒漠藻壳固沙培肥技术的应用提供了最直接的依据。另外研究中所采用的多学科交叉结合的实验手段也是研究自然状态所有土壤微生物的一个新思路。

关键词: 荒漠, 藻壳, 土壤发育, 固沙

中图分类号: S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2000)01-02

在世界各地的干草原、半荒漠、荒漠以及沙漠环境中很引人注目的景观之一就是土壤表面有层易剥离的漆黑的土壤结皮 (Soil patina), 从生物发生角度讲, 这是由于先锋藻类植物的生长而形成的, 所以又称之为藻壳 (Algal crust)。它不同于极其短暂、脆弱的雨壳 (Rain crust), 对荒漠土壤结构的改良, 肥力的提高和抗侵蚀性能的增强都有着重要的作用^[1,2]。为了深入揭示藻壳形成的机理和作用, 为治理荒漠和防止土壤荒漠化, 发展微藻固土培肥技术提供依据, 许多研究人员从藻壳的形成特征、藻类的生物组成、生态、生理、代谢产物及其与全球气候变化的关系等多方面进行了探讨^[3], 但由于实验方法的限制, 以前的研究都以检出和分离的方法完成的, 对于藻类植物在数毫米藻壳中的空间分布规律及这种规律与藻壳发育程度间的关系迄今尚无人涉足; 藻与基质间连接物质、结合方式等都出自理论上的推测, 而这些问题对深入揭示藻壳固沙机理和陆生藻应用技术的发展都有重要的意义。

1 材料和方法

1.1 样点概况

样品分别于 1997 年 8 月 24, 10 月 19, 12 月 20 日采自宁夏回族自治区中卫县沙坡头

收稿日期: 1998-08-06; 修订日期: 1998-08-25

基金项目: 中国科学院重点项目资助 KZ952-51-207

* 联系人: 刘永定

作者简介: 胡春香 (1965-), 女, 甘肃省静宁县人, 讲师, 博士学位, 水生生物学专业, 从事土壤藻类学研究。

(37°27' N, 104°57' E)。该地位于我国西北腾格里沙漠东南缘,地形波状起伏,地下水位很低。夏季地表最高温度达 74℃,冬季最低 - 25℃,有风日 (5m/s) 200d/y 以上,平均年降水量 203mm。采样区 50 年前还是一片流沙,经 1956、1964、1981、1994 年围栏、植树后形成了风沙固定区。作者对这四个围栏区及铁路旁大树下 (树木是 1956 年种植,目前,偶而还有黄河水灌溉,苔藓植物很丰富,但所选样点在地埂上,结皮从 1990 才开始形成) 五个不同年龄藻壳中藻类的精细分布、土壤微形态和矿化程度进行了比较研究 (表 1)。

1.2 研究方法

结构观察:依 Liu^[4]研究土壤藻的方法采样,即环刀法采样或无菌铲采集 (尽可能地选择距小灌木 20cm 外平缓、少地衣、藓类和其它植物的样点) 完好的藻壳于无菌培养皿中,Parafilm 膜封口,快速运回实验室。先用滑动切片机尽可能薄地分层分切,分别收集、称重、观察、培养、计数,初步确定电镜分切厚度。电镜 [日本 TEOL 公司] JSM-35CF 型扫描电镜。观察样品经液氮冷冻、环氧树脂浸透、金刚砂打磨、抛光、喷金、观察。藻类鉴定:将新鲜分切样,经 Chu's 10、BG11、BBM、HB-D1 等培养基培养、分离后,据 Desikachary (1959) 鉴定。生物量测定:一般土壤微生物培养计数法^[5]。物相分析:X-射线半微量定量法。土壤磨片制作:不饱和树脂固结,金刚砂打磨^[6]。pH、电导率、机械组成、化学分析:土壤常规分析方法^[6]。

| 表1 各样点的环境条件 | | | | | | | |
|------------------------------|---------|---------|-----------|---------|----------------|----------|---|
| Tab.1 Condition of all sites | | | | | | | |
| 样点 | 地 形 | 壳 表 面 | 壳 厚 度 | 年 龄 (年) | 水 源 | 覆 盖 度 % | 藻 数 / 绿 藻 数 / 克 干 土 |
| Site | Terrain | Surface | Thickness | Age | Water resource | Coverage | Number of total algae/ green algae/gram dry soil |
| | | | (mm) | | | | |
| 56 | 平坦 | 凸凹不平 | 2.5—3.5 | 41 | 降水 | 30—40 | 82458/6200 |
| 64 | 平坦 | 凸凹不平 | 2—3 | 33 | 降水 | 20—30 | 92100/6450 |
| 81 | 阴坡 | 较平滑 | 1—1.5 | 16 | 降水 | 10—20 | 58920/2940 |
| 94 | 凹地 | 凸凹不平 | 2—3 | 3 | 降水 | 0—10 | 67000/2680 |
| Tr | 平坦 | 较平滑 | 1—30 | 8 | 降水偶灌溉 | 80—90 | 64500/8100 |
| Ss | 平坦 | 无藻壳 | | | 降水 | 0 | 517/0 |

注: Tr—大树样点 56—1956年围栏样点 64—1964年围栏样点 81—1981年围栏样点 94—1994年围栏样点 Ss—流沙样点 下同

2 结 果

2.1 藻壳中藻类的分布规律 (表 2)

2.1.1 无机层 (0—20μm) 多数藻壳的表面覆盖着一层无机的沙粒、土粒等非生命物质 (图版 I: 1, 2), 但各围栏区内藻壳高隆、色深处有 *S. javanicum* 直接暴露在外。

2.1.2 富藻层 (20—1000μm) 按本研究所采用的工作程序, 富藻层指 100μm 内每 g 干藻壳中多于约 320mm³ 藻细胞, 藻体与沙粒结合紧密的层次。

I 层 (20—50μm) 当剥掉约 20μm 的表层后, 全是丝状蓝藻, 但不同样点优势藻种不同, 大树和 1956 (覆盖度较大) 样点的大部分地方以 *Nostoc* sp. 的幼体在 20—42μm 中数量最多, *S. javanicum* 在 40—50μm 分布, 而 1964、1981 和 1994 藻壳的全部及 1956 藻壳中局

部隆起的色较深处在 20—35 μm 深度,都以 *S. javanicum* 为主(图版 I: 5), 28—50 μm 以 *Nostoc* sp 为主。另外, 1956 和大树样点中已经有了单细胞绿藻 *P. viridis* 的分布。

II 层(50—100 μm) 所有样点以单细胞绿藻 *P. viridis* 占优势, 但 1956, 1964 和大树样点中普遍有少量丝状蓝藻 *M. vaginatus* 和硅藻 *Navicula* sp. 分布。

III 层(100—150 μm) 该层是藻类生物量最大的层次(每 100 μm 内每 g 干藻壳中近 2000mm³藻细胞), 尤其是丝状蓝藻非常丰富(图版 I: 6), 但所有样点以 *M. vaginatu* 为优势种, 1956 结皮中已经有了少量菌丝。

IV 层(150—500 μm) 该层藻类多样性最大, 绿藻、裸藻比其它层次相对多。大树样

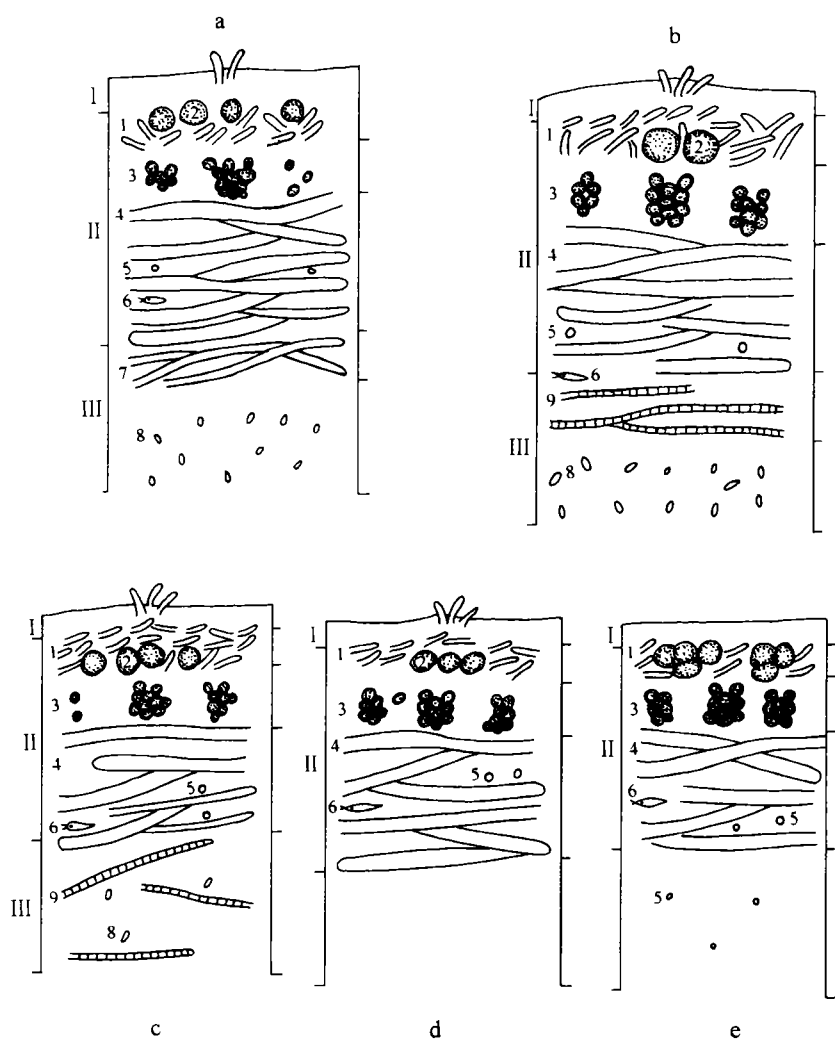


图 1 各藻壳中藻类分布的模式图

Fig.1 The model graph of algae distribution in all crusts

a—1956藻壳, b—1964藻壳, c—1981藻壳, d—1994藻壳, e—大树藻壳。1—*S. javanicum* 2—*Nostoc* sp.
3—*P. viridis* 4—*M. vaginatus* 5—Unicellular green algae 6—*Euglena* sp. 7—*P. tenue* 8—Diatom
9—*L. crytovaginitus* I—Inorganic-layer II—Algae-plentiful-layer III—Algae-sparse-layer

点中单细胞绿藻数量最多,其它样点仍都以 *M. vaginatus* 为优势种。

V 层 (500—1000μm) 该层藻类生物量有所下降,但硅藻,裸藻数量相对其它层次较多。各样点优势藻种差别比较大:1956 样点以 *P. tenue* 为优势种,1981 和 1964 样点则 *L. crytovaginat*us 最多,1994 和大树样点没有形成优势藻种。

2.1.3 疏藻层 (1000—3000μm) 每 100μm 内每 g 干藻壳中少于 320mm³ 藻细胞,藻体与沙粒结合很松散 (图版 I: 3)。1956,1964 样点都以硅藻门植物数量最多,而 1981 样点中仍以 *L. crytovaginat*us 最多,1994 和大树样点中藻类已经很少 (图版 I: 4)。

2.1.4 总结各样点藻类组成及其分层分布情况,得到了各样点的模式图 (见图 1):

2.2 土壤微形态观察

所有样点的微形态结构属于细粒-粉沙质密实结构,但各样点的矿质物相及 1000μm 深度的孔隙度有所不同 (表 3)。

表3 各样点的物相分析及微形态

Tab.3 Analysis of mineral and the difference of micromorphology

| 样点 | 石英 (%) | 长石 (%) | 方解石 (%) | 白云石 (%) | 伊利石 (%) | 绿泥石 (%) | 高岭石 (%) | 孔隙大小 (μm) | 孔隙度 (%) |
|------|--------|----------|---------|----------|---------|----------|-----------|--------------|----------|
| Site | Quartz | Feldspar | Calcite | Dolomite | Illite | Chlorite | Kaolinite | Size of pore | Porosity |
| 56 | 30—35 | 15—20 | 3 | 1 | 20—25 | | 20—25 | 2.5—12.5 | 5—10 |
| 64 | 45—50 | 20—25 | 3 | | 15—20 | | 10—15 | 2.5—15.5 | 4—11 |
| 81 | 45—50 | 20—25 | 1 | 3 | 15—20 | | 10—15 | 2.5—16.2 | 5—10 |
| 94 | 40—45 | 30—35 | | | 15—20 | | 15 | 2.5—18.3 | 6—12 |
| Tr | 35—40 | 15—20 | 5—10 | 2 | 15—20 | 10—15 | | 2.5—20.0 | 8—14 |
| Ss | 50—55 | 30—40 | | | 5 | | 5 | | |

3 讨论

3.1 藻壳的一般结构 从表 2 及模式图可见,自 1956 年起,在 40 年内不同发育时间的藻壳经不同自然季节 (夏,秋,冬) 取样研究,获得明显共同的特征,即藻壳表层是无机矿物质保护层,中间是藻类丰富的富藻层,下层是疏藻层。大树样点由于相对的低曝晒、多水分、富苔藓及黄河泥沙的沉积、板结,使富藻层仅在 20—150μm。蓝藻遍及所有藻壳的整个层次,绿藻主要在 III 层,硅藻在疏藻层。从表 2 也可以看出,随着结皮年龄的增大, *Nostoc* 及抗性较弱的其它蓝藻、绿藻、硅藻及真菌的分布位置有向表层上移的趋势,这在一定程度上反映了藻类在荒漠拓殖过程中缓慢而又有效的进展。

3.2 藻壳群落结构和空间分布特征 从表 2 看出各样点的藻类群落组成基本相同 (相似系数都在 0.70 以上),蓝藻不论在种类上还是在生物量方面都占绝对优势,但老藻壳中种类多样性最大,覆盖度最大样点中绿藻的数量和种类相对最多。从这些藻的空间分布来看,老藻壳中的优势藻种多变。1956 样点中,从上到下依次为 *S. javanicum*,单细胞绿藻 *P. viridis*,聚集能力强的 *M. vaginatus*, *P. tenue*,硅藻五个优势种,1964 样点有 *S. javanicum*, *P. viridis*, *M. vaginatus*, *L. crytovaginat*us,硅藻四个藻种,1981 样点中有 *S. javanicum*, *P. viridis*, *M. vaginatus*, *L. crytovaginat*us 四个藻种,1994 样点有 *Nostoc* sp., *P. viridis*, *M. vaginatus* 三个藻种,大树样点有 *Nostoc* sp., *P. viridis*, *M. vaginatus*,绿藻四个藻种。优势

种空间垂直变化的多样性说明了藻体的长期生长,增加了土壤的肥力,改变了微环境中土壤的理化条件,从而降低了周围环境的严酷性,形成了适合于多藻种生存的不同的生态位,使得一些在新藻壳(1981,1994 和大树)中不能生长的藻种也得以生存繁衍。

表 4 藻壳的机械组成(%)
Tab.4 The mechanical composition of the crust(%)

| 样点 Site | 砾石 Gravel | 粗沙粒 Coarse sand | 细沙粒 Fine sand | 粗粉粒 Coarse silt | 细粉粒 Fine silt | 粘粒 Clay |
|------------|--------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------|
| | 4-1mm | 1-0.25mm | 0.25-0.05mm | 0.05-0.01mm | 0.01-0.005mm | 0.005-0.001mm |
| 56 | 1.37 | 3.06 | 59.87 | 26.44 | 4.77 | 4.50 |
| 64 | | 3.66 | 82.00 | 13.00 | 0.33 | 1.00 |
| 81 | | 2.2 | 87.03 | 8.3 | 0.60 | 1.87 |
| 94 | | 1.30 | 76.06 | 18.76 | 0.87 | 3.00 |
| Tr | | 0.44 | 76.97 | 19.00 | 1.33 | 2.27 |
| Ss | | 4.84 | 95.17 | | | |

表 5 各藻壳的营养成分
Tab.5 Nutrition of the crusts

| 样点 Site | 有机质 Organic Matter(g/kg) | 全营养 Complete nutrition(g/kg) | | | | 速效养分 Rapidly available nutrition(mg/kg) | | | |
|------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------|--|---|-------------------------------|------------------|--|
| | | 全氮 Nitrogen | P ₂ O ₅ | K ₂ O | | 溶解氮 Soluble nitrogen | P ₂ O ₅ | K ₂ O | |
| 56 | 18.89 | 0.52 | 0.95 | 21.5 | | 28.2 | 11.8 | 179 | |
| 64 | 10.83 | 0.48 | 0.67 | 21.5 | | 32.9 | 7.2 | 123 | |
| 81 | 7.40 | 0.37 | 0.63 | 21.5 | | 28.2 | 8.8 | 105 | |
| 94 | 15.31 | 0.70 | 0.87 | 23.8 | | 44.9 | 10.0 | 123 | |
| Tr | 15.48 | 0.70 | 0.89 | 21.5 | | 39.9 | 8.5 | 150 | |
| Ss | 0.60 | 0.04 | 0.36 | 21.5 | | 12.3 | 9.2 | 79 | |

表 6 各样点藻壳的盐分分析
Tab.6 Salt analysis of the crust

| 样点 site | 阴离子 Negative Anion(mmol/L) | | | | 阳离子 Cation(mmol/L) | | | | pH | Electric conductivity(ms/cm) |
|------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|----------------|------|------------------------------|
| | CO ₃ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | | |
| 56 | — | 0.47 | 0.08 | 0.24 | 0.27 | 0.18 | 0.22 | 0.08 | 8.03 | 0.154 |
| 64 | — | 0.43 | 0.04 | 0.34 | 0.52 | 0.12 | 0.04 | 0.05 | 8.02 | 0.149 |
| 81 | — | 0.37 | 0.04 | 0.24 | 0.39 | 0.08 | 0.04 | 0.03 | 7.84 | 0.118 |
| 94 | — | 0.44 | 0.05 | 0.23 | 0.48 | 0.12 | 0.04 | 0.05 | 8.07 | 0.135 |
| Tr | — | 0.38 | 0.05 | 0.31 | 0.47 | 0.10 | 0.04 | 0.05 | 7.74 | 0.146 |
| Ss | — | 0.18 | 0.02 | 0.09 | 0.12 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 7.65 | 0.051 |

3.3 地形对藻壳形成和发育的影响 1994 年围栏的固沙区,仅低凹处有藻壳,其它地方仍是流沙,因为低凹处风力小,粉粒、粘粒保留较多,同时低处承纳了高处流入的营养而肥力有所提高(表 5),增加的盐基(表 6)使微环境更偏于碱性,所有这些又进一步有利于蓝藻的生长,因此,虽然 1994 藻壳中藻类组成和优势种变化比 1956 样点简单得多,但藻壳的

厚度已经与之相当,电导率和生物量仅次于 1964 样点,高于 1981 样点,这一方面说明了风力是该地藻壳形成的首要限制因子,另一方面也反映了人工调控、加速藻壳的形成是完全可行的。

3.4 藻体在藻壳形成和维持方面的作用 在沙坡头新扎草方格的迎风坡一个季风内粘粒和粉粒在范德华引力、库仑引力、风力及沙粒的挤压下,经 CaSO_4 、 CaCO_3 、氯化物、氧化铁等相互粘结、凝聚形成灰白色的锥形结皮,这种结皮相当脆弱,如果没有先锋植物的进一步生长,很快会被风力破坏。虽然不少真菌、地衣、藓类都有较强的聚土能力,但在贫瘠的沙漠环境中,只有光合自养的藻类才可能成为先锋拓殖者,况且多风的条件下只有聚集、粘结能力强的藻类才能真正久居。另外从(图版 I: 3)可看出,在菌丝比较多的疏藻层,藻、菌、沙的结合很松散;更重要的是在流沙表面暂时性的脆弱薄皮中,仅有 *M. vaginatus* 存在,而这种藻是由多条藻丝聚集、交织在一个公共胶鞘中形成的 15—150 μm 宽的丝体,外面有很厚的胶鞘,绳索状地跟沙粒、土粒缠绕、粘结在一起,对土壤颗粒的聚集能力很大^[7];它们既地处较良好的空间层次,又遍及该地所有藻壳中最大的空间范围,因此,它们对该地藻壳的形成和强度的增加有着重要的作用。

3.5 藻类与成土过程。从表(3)的物相分析不难看出,随着藻体的长期生长,加速了矿物质的分解速度,使以石英、长石为主的原生矿物质被逐渐分解为方解石、白云石,这些次生矿物质又被进一步分解成伊利石、绿泥石、高岭石等粘土矿物质。当然藻体的存在也可能吸附了一定的尘埃,段争虎等也证实降尘只是一小部分,因此藻的存在使藻壳中沙的比例逐渐减少,土的成分逐渐增多,分解过程中释放出的盐类作为营养供藻体生长,藻体的生长又进一步丰富了土壤,因此,土壤既是土壤藻的环境因子,又是土壤藻的产物。

3.6 藻壳发育程度可通过生物学、矿物学及土壤微形态学多方面比较从以下几点判断:

1) 土壤学的变化是几百年,甚至上千年才能完成的漫长过程,在几十年的历程中很难看到其结构方面的质变,因此在土壤微形态层次各样点的土壤虽然仍处于同一发育阶段,但不同年龄藻壳却还是表现有明显不同的特征:a)土壤的理化性质确已发生了显著的变化,土壤中粉粒、粘粒的含量明显增加(表 4);营养成分(表 5),无机盐(表 6)含量增多。b)风力小的地方,孔隙度较大。或许在其它环境中,这种量变足以导致土壤结构的质变,但在沙漠环境正在发育中的藻壳却因反复地被风雨侵蚀所阻断,而使土壤结构的改变很缓慢。

2) 矿物的分化与土壤形成不同,有些矿物(如石英)很稳定,需要很长时间才能分解,而有些(如钾长石)则易分解,因此几个样点中矿物逐渐分化的趋势很明显,但与藻壳年龄不完全一致。

3) 生物学角度反映藻壳的发育更灵敏、更精细。a)藻类群落结构越复杂,藻壳越趋于成熟,b)藻类空间分布层次越精细,藻壳越成熟。c) *Nostoc* 属种及弱抗性的其它蓝藻,绿藻,硅藻及菌丝的生态位越靠近表层,越有利于藻菌的结合,实现藻壳向地衣壳的转变。d)太阳辐射强度较低、粘土矿物质含量较高的微环境中 *S. javanum* 分布较少,绿藻种类相对丰富。e)单位重量最成熟藻壳(指大树样点的藻壳已发育到苔藓占优势的阶段)的藻类生物量并不一定最大(疏藻层厚度较大),但在藻壳发育初期,良好发育的藻壳有相对大的生物量,只是到了后期成熟藻壳的生物量增长较慢或基本保持稳定,甚至随着地衣、苔藓

的增多,出现下降趋势(表 1)。

综合以上论证,数 mm 厚的荒漠藻壳依靠自身精细的结构适应了风雨吹打的荒漠环境,固定了狂暴的流沙,加速了矿物的分解,促进了土壤的发育,而且本研究也证明了人工调控加速藻壳的形成是完全可行的,因此利用这些先锋植物固沙培肥无疑将是一项创举。

参 考 文 献

- [1] Metting B. The systematic and ecology of soil algae [J]. *The Botanical Review*. 1981, 47(2):195—312
- [2] 刘永定 黎尚豪. 土壤藻及其生理生态. 水生生物学报 [J], 1993. 17(3):272—277
- [3] Johansen J R. Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America[J]. *J. Phycol.* 1993, 29: 140—147
- [4] Liu Y D., Ley S H. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in ricefield soil, Hubei, China[J]. *Nova Hedwigia*. 1989, 48(1—2):55—67
- [5] 叶维青等译. (日)土壤微生物研究会. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 科学出版社. 1983, p: 92—93
- [6] 中国土壤学会土壤农业分析专业委员会. 土壤常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社. 1965, p: 1—127
- [7] Belnap J. Gardner J. S. Soil microstructure in the soil of the Colorado plateau: the role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*[J] *Great basin Naturalist*. 1993, 53:40—7

THE FINE STRUCTURE AND DEVELOPMENT OF ALGAL CRUSTS IN DESERT AREA

HU Chun-xiang^{1,2)}, LIU Yong-ding¹⁾, HUANG Ze-bo¹⁾ and SONG Li-rong¹⁾

1)(Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072)

2)(Department of Biology, Northwest Normal University, Lanzhou 730070)

Abstract: The fine structure and development of desert algae crusts were studied in Shapotou, Zhongwei county, Ninxia Hui autonomous region(37° 27' N, 104° 57' E), where an experimental station with pilots were enclosed and planted respectively in 1956, 1964, 1981 and 1994. The community structure and spatial distribution of algae on micron degree were firstly illustrated by using light microscope, SEM and polarizing microscope. The structure characteristics of the crusts and the eco-physiological behavior of dominant algae were analyzed in terms of algal biomass, physical and chemical properties and mineral composition in vivo. The relationship between the developmental degree of the crust, the community structure, soil micromorphology and the degree of mother material mineralization were determined biologically, agrologically and mineralogically. It is indicated that the use of terrestrial algae is feasible in desert fixation and soil amelioration.

Key words: Desert, Algae crust, Soil development, Desert fixation