

古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征

张元明¹, 陈晋², 王雪芹¹, 潘惠霞¹, 辜智慧², 潘伯荣¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 北京师范大学环境演变与自然灾害重点实验室, 北京 100875)

摘要: 新疆古尔班通古特沙漠是我国最大的固定和半固定沙漠, 其间广泛发育着以地衣植物为主的生物结皮, 是除种子植物以外的固定沙面的重要生物因子。研究表明, 选择适当的时段, 应用遥感技术并结合地面调查来研究沙漠生物结皮的空间分布格局是可行的, 遥感制图与地面调查的结果基本一致。该沙漠南部是生物结皮最为丰富的区域, 各种类型的生物结皮均有充分发育, 呈连续分布, 但其分布模式向北、向西和向东变得破碎。通过统计生物结皮像元的面积, 得到生物结皮覆盖率超过 33% 的像元面积占研究区总面积的 28.7%。生物结皮的分布对地貌部位有较强的选择性, 生物结皮的不同发育阶段种类组成亦有较大的差别。

关键词: 生物结皮; 遥感; 古尔班通古特沙漠; 新疆

地表结皮是陆地表面广泛分布的一类自然现象, 在干旱和半干旱地区的土壤表面也普遍存在, 主要包括物理结皮和生物结皮两大类型。其中, 生物结皮作为干旱沙漠地区特殊环境的产物, 是由细菌、真菌、蓝绿藻、地衣和苔藓植物与土壤形成的有机复合体。它的形成使土壤表面在物理、化学和生物学特性上均明显不同于松散沙土, 具有较强的抗风蚀功能和重要的生态及地学效应, 成为荒漠地区植被演替的重要基础^[1, 2]。研究表明, 由于生物结皮具有独特的生理生态过程, 使其可广泛存在于各种生境条件下^[3], 包括极端干旱、高温 (最高温度可达 70 °C) 和高 pH 值的环境^[4, 5]。生物结皮的分布已在世界各大荒漠地区得到确认, 在某些地区其盖度甚至可占到地表的 70%^[3]。生物结皮在荒漠生态系统中的重要性表现为: (1) 生物结皮中细菌、真菌、地衣和苔藓植物的地下菌丝和假根能够黏结沙粒^[6], 它们的存在能够有效地减小风和水对荒漠地表的侵蚀, 对降低防沙固沙的投入成本和改善生态环境起着积极的作用^[4, 7]。(2) 生物结皮中的某些种类能够固定大气中的氮素, 对土壤理化性质的改变和增加土壤有机质含量起着重要作用, 从而为维管植物的定居创造有利条件, 最终起到固定沙丘的作用^[8]。(3) 生物结皮的出现和发展指示了流动沙漠向固定和半固定沙漠转化的重要阶段, 可被用作生态环境健康评价的指标, 其时空变化可揭示干旱荒漠地区生态环境的演变趋势和对全球变化的响应规律^[9]。尽管生物结皮在荒漠生态系统中起着重要作用, 但长期以来却很少被作为主要生物因素来加以关注^[10, 11], 直到 80 年代以后, 伴随着沙漠化威胁的日益加重, 生物结皮在荒漠生态系统中的重要作用愈发突出, 才逐渐引起人们的重视^[12-27], 生物结皮资源的保护被列为荒漠生态系统管理的最优先等级^[9, 12, 28]。为了达到有效保护生物结皮资源并发挥其重要作用的目的, 揭示生物结皮资源空间分布特征和规律成为一个需要解决的首要问题。

生物结皮资源空间分布特征和规律的分析可利用遥感信息并结合地面调查方法实现, 对生物结皮典型分布区进行样方调查有助于了解其在地貌部位的种、属分布格局;

收稿日期: 2004-04-10; 修订日期: 2004-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043509); 国家自然科学基金重大研究计划(90202019); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 [Foundation: The National Basic Research Program of China, No.G1999043509; National Natural Science Foundation of China, No.90202019; Key Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX3-SW-343]

作者简介: 张元明 (1972-), 男, 研究员, 主要从事干旱区植物生态学研究工作。E-mail: zhang-y-m@263.net

同时, 基于遥感信息并结合地面调查, 可从较大的空间尺度来解读其分布格局。近 20 年来, 国外学者已在这方面开展探索性研究工作, 但绝大多数研究停留于生物结皮的光谱特征分析^[29-38], 未能根据生物结皮的光谱特征提出一套基于遥感信息的提取生物结皮的空间分布格局的方法。虽然, Karnieli (1997) 曾提出了一个基于遥感数据结皮指数用于解读以蓝绿藻为主的生物结皮的空间分布^[39], 但该结皮指数不适用于以地衣植物为主的生物结皮, 而以地衣植物为主的生物结皮是冷沙漠 (cold desert) 主要的生物结皮类型^[28]。古尔班通古特沙漠位于新疆北部准噶尔盆地中部, 是我国最大的固定和半固定沙漠, 其间广泛分布着以地衣植物为主的生物结皮, 为该沙漠的固定起着重要的作用。近些年, 日益加剧的石油开采和放牧等人类活动对该沙漠地表生物结皮产生了一定的影响和扰动; 因此了解该沙漠生物结皮的空间分布特征对于保护这一重要的生物资源具有深远的意义。然而遗憾的是由于有关生物结皮的研究在我国刚刚起步, 该沙漠生物结皮资源的空间分布规律基本处于空白状态。基于上述状况, 我们在野外采样和光谱测量的基础上, 构建了一个以遥感图像为信息源适用于提取以地衣植物为主的生物结皮的结皮指数^[40]。以此为基础, 同时结合大量的野外采样和室内分析, 本文首次进行了古尔班通古特沙漠生物结皮制图, 并分析了古尔班通古特沙漠生物结皮空间分布特征和不同地貌部位的种、属分布格局。

1 研究区概况

古尔班通古特沙漠 (以下称古沙漠) 位于新疆北部准噶尔盆地腹心, 范围为北纬 44°11' 至 46°20', 东经 84°31' 至 90°00', 面积 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是我国最大的固定和半固定沙漠, 其周围还有零星分布有许多面积大小不等的沙漠或沙地。其南缘区与源出天山的冲积、洪积扇缘相接, 构成了天山北坡至盆地自然垂直带的基带。该沙漠年平均降水量普遍不超过 150 mm, 沙漠腹地仅有 70~100 mm, 主要集中于春季。年平均蒸发量在 2000 mm 以上。年均温 6~10 °C, 极端高温为 40 °C 以上, $\geq 10 \text{ °C}$ 的活动年积温可达 3000~3500 °C, 空气相对湿度平均 50%~60%, 5~8 月通常在 45% 以下。该沙漠由白梭梭、梭梭和其他沙生植物构成的小半乔木群落广泛发育, 同时由于降水的季节分配较为均匀, 冬春有一定的雨水, 使短命和类短命植物获得一定发育^[41]。除此以外, 该沙漠地表还发育有良好的生物结皮, 根据水分条件、生物种类和发育阶段的不同而呈现出黑色、黑褐色、白色和黄绿色等 (图 1)。



图 1 古尔班通古特沙漠景观 (左) 及生物结皮近观 (右)

Fig. 1 Interview of Gurbantunggut Desert (left) and different types of biological soil crust a. algae crust; b. lichen crust; c. moss crust

2 研究方法

据野外观察, 该沙漠地表的生物结皮常年存在, 主要利用春季融雪、临时性降水和露水进行生长, 并在干旱缺雨季节进入休眠状态。本研究野外调查、采样及地物光谱测定的时间分别选择在 2002 年 10 月~11 月、2003 年 10 月~11 月降雪前进行, 此时沙漠中的种子植物多数枯萎凋落, 地表生物结皮裸露并处于生长期, 有利于观测与采样。同时, 用于遥感分析的覆盖研究区的 4 景 Lantsat ETM 图像也来源于该时段 (2002 年 10 月~11 月, Path/Row: 142/28, 142/29, 143/28, 143/29)。

2.1 断面调查与样品采集

在沙漠东、南、西、北、中等部位选择生物结皮分布的典型沙垄(或沙包), 共设置 33 个样点(图 2), 每一沙垄断面按丘间低地—垄西坡—垄顶—垄东坡—丘间低地的顺序设置样方(图 3), 调查中采用 100 cm×100 cm 的样方, 记录生物结皮盖度(野外仅以编号记录, 种类鉴定在实验室中完成)、结皮硬度、微地形等内容。为取得原状样品, 以环刀(改进型, 高 12 cm, 直径 8 cm)采集样方中所有生物结皮种类, 尽快运至实验室, 将不同类型生物结皮鉴定到种。其中, 微生物结皮取表层 0~5 cm 的土样, 野外密封以防止污染, 迅速运至实验室进行培养和鉴定。

2.2 地物光谱测量

地物光谱样本采集和测定与断面调查同步进行, 共采集研究区主要地表覆盖物的 43 个样本, 分为 5 组: (1) 地衣为主的生物结皮; (2) 苔藓为主的生物结皮; (3) 藻类为主的生物结皮; (4) 裸沙和 (5) 干枯植物, 包括干枯的小半乔木、灌木(Stand dead)和枯枝落叶, 这一组收集了研究区内典型的小半乔木、灌木和草本植物, 包括白梭梭、梭梭、猪毛菜、琵琶柴、蛇麻黄、羽毛三芒草、白茎绢蒿、条叶亭芥、沙蒿、对节刺和刺沙蓬等。所有生物结皮和裸沙的样本都取自土壤表层(3 cm 厚度), 并置放在有盖培养皿内。每组的样本数分别为 13、6、5、8 和 11。由于采样期间无降水过程, 所有的样本均处在干燥条件下。

地物光谱测量采用日本光谱有限公司生产的 MMS-1 便携式分光光谱仪, 光谱范围为 400~1100 nm, 共 350 个波段, 波段宽度为 2 nm, 视场角为 15°。该光谱仪为双通道分光光谱仪, 其最大优点在于可同步测量目标物和参考白板的反射照度并计算反射率, 能够最大限度地减小测量过程中光照条件变化的影响。测量过程中光谱仪探头置于样本上方约 20 cm 处, 以保证探头视角范围内样本的覆盖率为 100%。测量时间为地方时 10:00~15:00, 天气晴朗无云。对每个样本共重复测量 10 次, 以 10 次测量值的平均值作为各样本的反射率(图 4)。与裸沙和干枯植物相比, 三种生物结皮由于表面呈黑色或黑褐色, 具有较低的反射率(均低于 30%)。另一个显著的特征是三种生物结皮由于受光合作用色素的吸收特征影响, 在 600~700 nm 的光谱曲线表现为非常平缓的上升趋势。此外, 与绿色植被的反射特征不同的是, 生物结皮在 550 nm 处没有显示出反射峰。

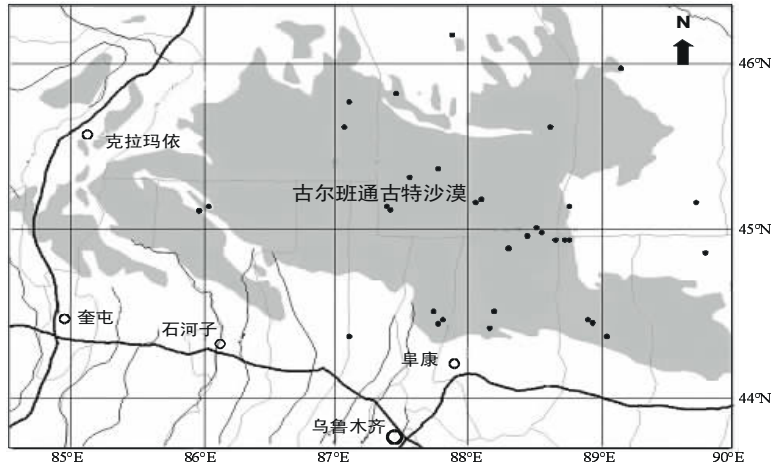


图 2 样点分布图

Fig. 2 Sampling sites distributed in Gurbantunggut Desert

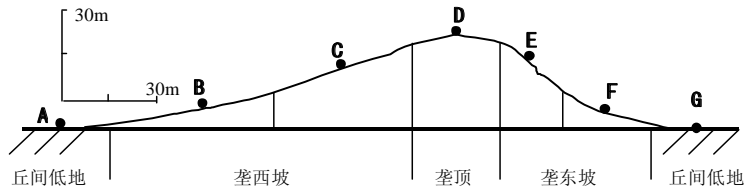


图 3 不同地貌部位的样方布设

Fig. 3 Collection samples in different locations of sand dune

3 结果与讨论

3.1 不同地貌部位生物结皮的分布特征

生物结皮的分布对地貌部位有较强的选择性,同时组成生物结皮的孢子植物类群与微环境差异有着密切的关系,生物结皮的不同发育阶段种类组成亦有较大的差别。

沙垄顶部为流动或半流动沙丘,主要以微生物种类分布为主,但沙丘较低时,局部区域亦分布有藻类结皮。古沙漠不同地貌部位、不同土壤层次中均含有微生物群落,包括细菌、放线菌和真菌,是生物结皮的重要组成部分和先锋物种,为生物结皮的演替创造良好的环境。该沙漠微生物类群广泛分布于各种发育阶段和各种类型的生物结皮当中,从垄顶至丘间低地均有分布,且细菌和放线菌的数量均远远大于真菌的数量。从垄顶部至丘间低地,表层土壤真菌的数量逐渐增加,至丘间达到最大;细菌的数量略大于放线菌,但变化趋势基本一致,即垄顶数量最多。

沿沙垄顶部向两侧坡间延伸,开始出现发育较弱的藻类结皮,干燥状态下多呈灰白色或浅灰色,厚度在 0.05~0.1 cm 之间,脆而极易破损。从坡上部至坡中部出现发育充分的藻类结皮,干燥状态下呈灰黑色或灰绿色,厚度在 0.1~0.5 cm 之间,具有一定的抗机械能力,并在局部微地形凸起部位有地衣植物出现,色黑而质硬。沿坡中部至坡下缘部,逐渐开始发育有良好的地衣结皮,地表呈黑色,质硬。地衣结皮间裂缝、水蚀沟或牲畜蹄印内发育有藻类结皮。地衣植物是真菌与藻类植物共生后所形成的一种新的植物体,不同种类间的颜色、形态和大小具有较大的变化。古沙漠地表的地衣植物常呈现出黑色、白色、棕色、黄色或绿色。地衣结皮是古沙漠的主要生物结皮类型,在该沙漠有着最广泛的分布。在古沙漠不同部位,其南部是藻类植物最为丰富的区域,其次为中部地区,而在生物结皮不甚发育的西部和东部地区,藻类植物的种类也较少。

由于地衣的出现是以真菌和藻类的共同存在为前提,而垄顶的真菌和藻类的数量相对较少(指流动沙面,在古沙漠的沙丘垄顶占主要地位),加之沙面流动性较大,因此在沙垄顶部极少有地衣结皮的分布,除非是一些低矮的小型沙丘。垄西坡地衣结皮发育较垄东坡好,向垄顶分布的上限较高。沿沙坡至丘间低地,地衣结皮成片发育,分布面积较广,在水蚀或风蚀后留下的地表突出部位发育强烈,色黑而质硬。但由于地衣植物体较脆,因此尽管地衣结皮厚度较大,抗机械压力的能力却较弱。然而值得一提的是,地衣植物具有较强的无性繁殖能力,在干扰后的裸露沙面,地衣植物能迅速生长。据我们的野外观测,丘间地表完全破坏的裸露沙面(20 cm×20 cm)经 2~3 年便能出现地衣结皮与藻结皮,其中的演替机理有待进一步研究。古沙漠南部是地衣结皮发育最完善的地区,中部和北部次之,而西部仅在丘间局部区域有发育,面积甚小,以东部发育程度最弱。

苔藓植物是小型的非维管植物,参与古沙漠地表生物结皮的苔藓植物均为耐旱性极强的藓类植物,未发现苔类植物^[43]。其中主要以墙藓属(*Tortula*)植物占优势,如刺叶墙藓(*Tortula desertorum*)群落。苔藓植物主要发生于丘间低地,呈斑块状分布,往往形成较大面积的纯群,在蛇麻黄等低矮灌丛下发育得尤为突出。这些区域的苔藓结皮均匀而致密,不利于种子植物的种子着床和萌发,除角果藜、牻牛儿苗等具特殊种子特性的

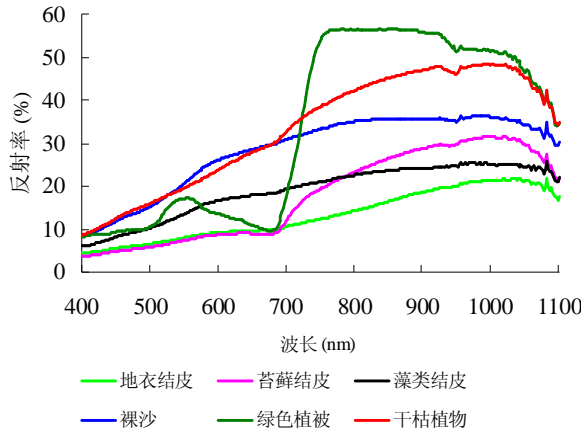


图 4 研究区主要地物光谱反射率曲线

Fig. 4 Field spectral reflectance curves for bare sand, biological crust, vascular plant and dry plant

草本植物外, 其他草本植物几乎不能在上面生长。

苔藓结皮中, 墙藓属植物个体较大, 地上部分高达 0.5~1.2 cm, 叶尖具白色突出的芒尖, 可反射强光, 以减少强光对植物体造成的伤害。该属植物在丘间生物结皮中处于绝对优势地位, 干燥状态下使生物结皮呈现出黑色, 并因芒尖的存在而使表面略带白色。苔藓植物向上可分布于沙坡下部, 但多数仅限于蛇麻黄等低矮灌木丛下, 且盖度较小。受水分条件和沙面基质的影响, 沿坡下缘向上至垅顶则不再有苔藓植物的分布。

古沙漠南部大部分区域和北部部分地区是苔藓结皮最为发育的区域, 尤以南部发育最好, 且面积较大, 主要以墙藓属植物和真藓属植物为优势。北部亦有一定面积的苔藓结皮分布, 以墙藓属植物和绿色流苏藓 (*Crossidium chloronotos*) 为优势。沙漠东部至火烧山区域, 生物结皮发育极其微弱或无, 地表基本为流动或半流动沙面, 苔藓植物及其他类型的生物结皮没有分布。西部由石西油田至莫索湾地区, 仅有少量苔藓植物分布, 以真藓属植物为主, 且仅分布于梭梭、怪柳等灌丛下。

丘间低地是生物结皮最为丰富的部位, 这里地势低缓, 有时亦能形成洼地, 多在融雪、降水过程后出现临时性积水, 为孢子植物, 尤其是苔藓植物的有性繁殖与营养生长创造良好的环境条件。在这些地貌部位, 苔藓植物除分布于低矮灌丛下外, 还在灌丛间形成面积不等的纯群, 与发育良好的地衣结皮镶嵌分布, 干燥时呈黑色、黑褐色, 湿润时呈绿色。丘间苔藓和地衣结皮的大量发育, 使得这些区域的生物结皮具有较大的厚度和较强的抗机械能力, 结皮厚度可达 3~5 cm, 较耐践踏。因此, 古沙漠丘间低地是该沙漠生物结皮发育最为完善的区域。

3.2 基于遥感数据的生物结皮空间分布制图

根据前面所描述的生物结皮的光谱特性: 1) 在绿光和红光波段生物结皮的光谱曲线上上升趋势比裸沙和干枯植物平缓; 2) 生物结皮在可见光—近红外波段比裸沙和干枯植物的反射率低很多。同时考虑 Landsat ETM 传感器的波段设置, 我们提出一个新的生物结皮指数 (BSCI) 来区别结皮和非结皮区域。其定义如下:

$$BSCI = \frac{1 - L \times |R_{green} - R_{red}|}{R_{GRNIR}^{mean}} \quad (1)$$

式中: R_{green} , R_{red} 分别表示 Landsat ETM 传感器的绿光和红光波段 (即第 2 和第 3 波段) 的反射率, R_{GRNIR}^{mean} 为绿光、红光和近红外波段反射率的平均值, 对应 Landsat ETM 传感器的第 2、第 3 和第 4 波段。考虑到遥感数据的原始 DN 值对太阳—目标物—传感器的几何光学位置的变化非常敏感^[42], 该指数须采用地表反射率或大气顶部反射率 (TOA) 计算。L 为一个经验调整参数, 用于强调 R_{green} 和 R_{red} 差的绝对值的贡献率, 通过多次试验, 本研究中设定为 2。该生物结皮指数可认为是生物结皮在 Landsat ETM 波段 2、3、4 的光谱特征的一个增强, 使之相对于作为背景的裸沙和干枯植物表现为较高的值。

按照 BSCI 的定义并考虑卫星传感器的空间分辨率, 可以认为 BSCI 值的大小主要取决于像元内生物结皮的覆盖率。生物结皮覆盖率增加, BSCI 值也增加。与之相反, 背景地物的覆盖率增加, 则 BSCI 值降低。为了利用该指数对生物结皮进行监测和制图, 关键的一步是确定传感器在不同大气条件下该指数的上限和下限阈值。这里, 下限阈值定义为传感器所能探测的生物结皮最低覆盖率所对应的 BSCI 指数值, 下限阈值的设定可以用于区别背景地物 (裸沙和干枯植物) 和生物结皮; 而上限阈值则对应于生物结皮覆盖率达到 100 % 时的 BSCI 指数值。由于水和阴影在绿光、红光和近红外波段的反射率过低, 可造成水和阴影的像元 BSCI 指数值大于生物结皮覆盖率达到 100 % 时的 BSCI 指数值。因此, 上限阈值的设定可以用于区分结皮与水、云和高大沙丘的阴影。通过对 Landsat ETM 传感器在不同大气条件下的辐射传输模拟, 我们得到使用大气纠正后的 Landsat ETM 数据

时的 BSCI 指数下限和上限阈值分别为 3.69 和 6.59, 下限阈值所对应的 Landsat ETM 传感器可探测的生物结皮最低覆盖度为 33%^[40]。

以 2002 年 10~11 月时段的 4 景 Landsat ETM 图像作为数据源, 在对数据进行几何纠正、大气顶部 TOA 反射率转换、大气校正和图像镶嵌等处理的基础上, 计算出研究区内各像元的 BSCI 值并分别与辐射传输模拟获得的上下限阈值相比较, 从而提取出地表生物结皮覆盖率超过 33% 的像元, 完成研究区生物结皮空间分布制图 (图 5)。

3.3 生物结皮空间分布格局

本研究区的生物结皮分布具有两方面的特征: (1) 生物结皮主要分布在古沙漠南部, 该地区是生物结皮最为丰富的区域, 各种类型的生物结皮均有充分发育, 其次为中部和北部地区。沙漠东部至火烧山区域, 生物结皮发育极其微弱或无, 再向东地表基本为流动或半流动沙面, 生物结皮没有分布。中部向西的区域生物结皮有所发育, 但不似南部地区连续, 多为间断性分布, 且面积较小。由石西油田至莫索湾以西地区生物结皮亦发育极其微弱或无。(2) 在古沙漠南部生物结皮呈连续分布, 但其分布模式向北、向西和向东变得破碎。从 Landsat ETM 影像中获得的生物结皮的这种分布格局和我们野外的调查基本一致。但形成该分布格局的原因尚不清楚, 还需要进一步的研究。通过统计生物结皮像元的面积, 得到生物结皮覆盖率超过 33% 的像元面积占研究区总面积的 28.7%, 由于 Landsat ETM 传感器可探测的生物结皮最低覆盖度为 33%, 该统计结果可能低估生物结皮在研究区的总分布面积。

4 结论

(1) 新疆古尔班通古特沙漠是我国最大的固定和半固定沙漠, 其间广泛发育着以地衣植物为主的生物结皮, 是除种子植物以外的固定沙面的重要生物因子。生物结皮的分布对地貌部位有较强的选择性, 生物结皮的不同发育阶段种类组成亦有较大的差别。

(2) 选择适当的时段, 应用遥感技术并结合地面调查来研究沙漠生物结皮的空间分布格局是可行的, 遥感制图与地面调查的结果基本一致。古沙漠南部大部分地区和中部、北部部分地区是生物结皮最为发育的区域, 尤以南部发育最好, 各种类型的生物结皮均有充分发育, 呈连续分布, 且面积较大。其分布模式由南向北、向西和向东变得破碎。

(3) 通过统计生物结皮像元的面积, 得到生物结皮覆盖率超过 33% 的像元面积占研究区总面积的 28.7%。

参考文献 (References)

- [1] Nash T H, White S L, Marsh J E. Lichen and moss distribution and biomass in hot desert ecosystems. *The Bryologist*, 1979, 80: 470-479.
- [2] Loria M, Hernstad I. Moss capsules as food for the harvest ant, *Messor*. *The Bryologist*, 1980, 83: 524-525.
- [3] Belnap J, Harper K T, Warren S D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: nitrogenase activity, chlorophyll

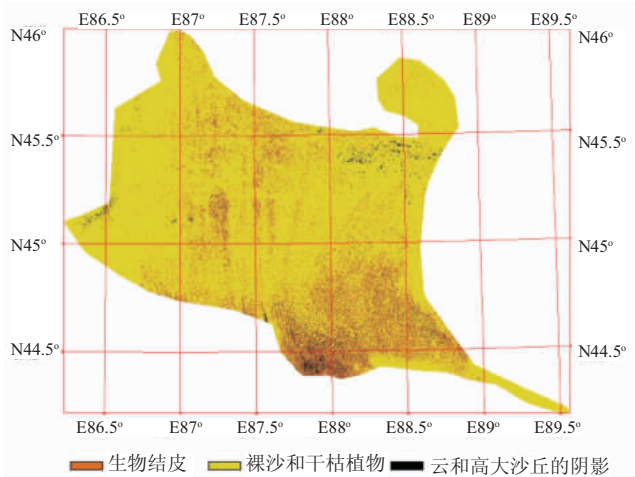


图 5 基于遥感技术的古尔班通古特沙漠生物结皮空间分布
Fig. 5 The spatial distribution patterns of biological crust in Gurbantungut Desert based on remote sensing techniques

- content and chlorophyll degradation. *Arid Soil Res. Rehabil.*, 1994, 8: 1-8.
- [4] Friedmann E I, Galun M. Desert algae, lichens and fungi. In: Brown G W (ed.), *Desert Biology*. New York: Academic Press, 1974. 165-212.
- [5] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179-223.
- [6] Belnap J. Surface disturbances. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, 37: 39-57.
- [7] Cameron R E. Desert algae. Jet Propulsion Lab Technical Report, 1966, 32: 1-41.
- [8] Belnap J, Gardner J S. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau: the role of the cyanobacterium *Microcoleus vaginatus*. *Great Basin Nat.*, 1993, 53: 40-47.
- [9] Stoddart L A, Smith A D, Box T W. *Range Management*. New York: McGraw-Hill, 1943. 532.
- [10] Daubenmire R. Steppe vegetation of Washington. *Agricultural Experiment Station Technical Bulletin No.62*, Washington State University, Pullman, 1970. 131.
- [11] Hironaka M, Fosberg M A, Winward A H. Sagebrush-grass habitat types of southern Idaho. *University of Idaho Forest, Wildlife and Range Experiment Station Bulletin No.35*, University of Idaho, Moscow, 1983. 44.
- [12] Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts. *Aus. J. Soil Res.*, 1994, 32: 389-415.
- [13] Townshend J R, Justice C O. Analysis of dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. Rem. Sens.*, 1986, 12: 1224-1242.
- [14] Li Xinrong, Jia Yukui, Long Liqun et al. Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid region. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(1): 4-12. [李新荣, 贾玉奎, 龙利群 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. *中国沙漠*, 2001, 21(1): 4-12.]
- [15] Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Zhao Yunjie. Microbiotic soil crust. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 474-480. [杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮. *生态学报*, 2001, 21(3): 474-480.]
- [16] Harper K T. A role for nonvascular plants in management of arid and semiarid rangeland. In: Tueller P T, *Vegetation Science Applications for Rangeland Analysis and Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 135-169.
- [17] Friedmann E I, Ocampo-Paus R. Endolithic blue-green algae in the dry valley: primary producers in the Antarctic desert ecosystem. *Science*, 1976, 193: 1247-1249.
- [18] Townshend J R, Justice C O. Analysis of dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. Rem. Sens.*, 1986, 12: 1224-1242.
- [19] Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crust: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.
- [20] Eldridge D J, Bradstock R A. The effect of time since fire on the cover and composition of cryptogamic soil crust on a eucalypt shrubland soil. *Cunninghamia*, 1994, 3: 521-527.
- [21] Eldridge D J, Ferris J. Recovery of populations of the soil lichen *Psora crenata* after disturbance in arid South Australia. *The Rangeland Journal*, 1999, 21: 194.
- [22] Eldridge D J. Trampling of microphytic crusts on calcareous soils and its impact on erosion under rain-impacted flow. *Catena*, 1998, 33: 221-239.
- [23] Anderson D C, Harper K T, Rushforth, S R. Recovery of cryptogamic soil crust from grazing in Utah deserts. *Journal of Range Management*, 1982, 35: 180-185.
- [24] Callison J, Brotherson J D, Bowns J E. The effects of fire on the blackbush (*Coleogyne ramosissima*) community of southwest Utah. *Journal of Range Management*, 1985, 38: 535-538.
- [25] Jeffries D L, Klopatek J M. Effects of grazing on the vegetation of the blackbrush association. *Journal of Range Management*, 1987, 40: 390-392.
- [26] Cole D N. Trampling disturbance and recovery of cryptogamic soil crusts in Grand Canyon National Park. *Great Basin Naturalist*, 1990, 50: 321-325.
- [27] Belnap J. Measuring restoration success: a lesson from Patton's tank tracks. *Ecological Bulletin*, 1998: 79: 33.
- [28] Belnap J. The world at your feet. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(5): 181-189.
- [29] Graetz R D, Gentle M R. The relationship between reflectance in the Landsat wavebands and the composition of an Australian semi-arid shrub rangeland. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1982, 48: 1721-1730.
- [30] Ager C M, Milton N M. Spectral reflectance of lichens and their effects on the reflectance of rock substrates. *Geophysics*, 1987, 52: 898-906.
- [31] Jacobberger P A. Reflectance characteristics and surface processes in stabilized dune environments. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 28: 287-295.
- [32] O'Neill A L. Reflectance spectra of microphytic soil crusts in semiarid Australia. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 675-681.

- [33] Rollin E M, Milton E J, Roche P. The influence of weathering and lichen cover on the reflectance spectra of granitic rocks. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 50: 194-199.
- [34] Karnieli A, Tsoar H. Satellite spectral reflectance of biogenic crust developed on desert dune sand along the Israel-Egypt border. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16: 369-374.
- [35] Tsoar H, Karnieli A. What determines the spectral reflectance of the Negev-Sinai sand dunes. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17: 513-525.
- [36] Karnieli A, Shachak M, Tsoar H. The effect of microphytes on the spectral reflectance of vegetation in semiarid regions. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 57: 88-96.
- [37] Karnieli K, Sarafis V. Reflectance spectrometry of cyanobacteria within soil crusts: a diagnostic tool. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 8: 1609-1615.
- [38] Pinker R T, Karnieli A. Characteristic spectral reflectance of a semi-arid environment. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16: 1341-1363.
- [39] Karnieli A. Development and implementation of spectral crust index over dune sands. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18: 1207-1220.
- [40] Chen J, Zhang Y M, Tamura M et al. A new index for mapping lichen-dominated biological soil crust in desert area. *Remote Sensing of Environment*, 2003, in revision.
- [41] Zhang Liyun, Chen Changdu. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut sandy desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1923-1932. [张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. *生态学报*, 2002, 22(11): 1923-1932.]
- [42] Huang C, Wylie B, Yang L et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. USGS EROS Data Centre, 2000. Internet source: <http://landcover.usgs.gov/pdf/tasseled.pdf>.
- [43] Zhang Yuanming, Cao Tong, Pan Borong. A study on bryophyte associated with formation of soil crust in south fringe of Gurbantunggut Desert in Xinjing. *Acta Bot. Boreal-Occidentalis Sinica*, 2002, 22(1): 18-23. [张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆古尔班通古特沙漠南缘土壤结皮中苔藓植物的研究. *西北植物学报*, 2002, 22(1): 18-23.]

The Distribution Patterns of Biological Soil Crust in Gurbantunggut Desert

ZHANG Yuanming¹, CHEN Jin², WANG Xueqin¹,
PAN Huixia¹, GU Zhihui², PAN Borong¹

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China*; 2. *Key Lab. of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Ministry of Education of China, Beijing 100875, China*)

Abstract: The biological soil crust, especially lichen crust, was developed well in Gurbantunggut Desert, the largest fixed and semi-fixed sandy desert in China. Together with vascular plant, biological soil crust becomes an important factors relating to sandy surface fixation. In this study, the reflectance of lichen-dominated biological soil crust was measured and used to develop a new index for detecting and mapping the crust distribution. We examined the feasibility of the index for Landsat ETM sensor by using radiative transfer model (6S) to simulate different coverage of the crust under different atmospheric conditions. Then, we applied the new index to Landsat ETM data of the Gurbantunggut desert to map the spatial distribution patterns of biological soil crust in Gurbantunggut Desert. The results, combined with field investigations, showed that the biological soil crust was mainly distributed in southern part of this desert, but became gradually sparse toward northern, western and eastern parts of this desert. The coverage of biological soil crust was estimated up to 28.7%. The species composition of biological soil crust varies according to different positions of sand dunes and different developmental stages of biological crust.

Key words: biological soil crust; remote sensing; Gurbantunggut Desert; Xinjiang