

新疆古尔班通古特沙漠生物结皮在沙丘尺度的生态与环境解释*

陈亚宁 李卫红 张元明 周智彬 刘加珍

中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

摘要 研究表明, 古尔班通古特沙漠广泛发育着种类丰富的地衣、苔藓和藻类生物结皮, 其形成、类型和分布状况与所处沙丘部位的环境条件密切相关, 在沙丘顶部的流动或半流动沙面上, 以微生物种类为主, 沙丘两坡的上部至中部主要为藻类结皮, 沙丘的中、下部为地衣结皮, 苔藓结皮主要分布在沙丘下部及丘间地带。从沙丘上部、中部至沙丘下部及丘间, 生物结皮的厚度及发育程度呈增强态势, 并且与不同植物群落类型的分布形成明显对照。生物结皮在沙丘不同部位的发育特点和分异是不同类型生物结皮对区域环境条件综合适应的一种生态表现和自然选择, 与沙丘不同地貌部位的土壤理化性状、地表基质稳定性等生态条件有着密切的关系。

关键词 生物结皮 沙丘尺度 环境解释 古尔班通古特沙漠

生物结皮是土壤表层苔藓、地衣、藻类、细菌等生物组分与土壤构成的有机复合体, 由于生物结皮独特的生理生态过程, 使其可存在于各种荒漠生境条件下, 在世界干旱、半干旱地区的各大荒漠区都广泛分布和发育着生物结皮^[1,2]。作为干旱区环境保护和生态恢复中新的研究热点之一, 生物结皮在荒漠化发生发展及其防治中所起的重要作用愈来愈引起人们关注。研究表明, 荒漠区地表生物结皮不仅能够稳定沙丘表面, 减少土壤侵蚀, 起到积极的防沙治沙作用。而且, 具有改变荒漠区土壤理化性质、影响地表水文和土壤养分循环的生态功能^[3], 能够为维管植物的发育创造条件, 促使植被演替和维管植物的萌发和生长, 起到改善生态的作用^[4-6]。

准噶尔盆地是世界上典型的温带荒漠区, 分布有我国第二大沙漠——古尔班通古特沙漠。准噶尔

盆地的荒漠植被中, 既有典型的沙漠植物群落, 也有典型的盐漠植物群落, 以及种类和数量较大的短命和类短命植物。同时, 还存在种类丰富的地衣、苔藓和藻类植物, 形成厚约 2—5 cm 的生物结皮, 尤其在古尔班通古特沙漠南部区域的沙丘间低地, 生物结皮的盖度可达 70%—80%。这些生物结皮是古尔班通古特沙漠中除种子植物以外稳定沙丘表面的重要生物因子, 它们对沙丘表面稳定、固定沙丘起到了重要作用。正因如此, 古尔班通古特沙漠生物结皮的研究开始受到关注^[7]。本文探讨和解析了古尔班通古特沙漠南缘个体沙丘表面生物结皮的发生特点和生物结皮发育的环境特征, 旨在揭示古尔班通古特沙漠生物结皮在沙丘尺度的发生过程和分布规律, 进一步理解和认识生物结皮在干旱荒漠区防沙治沙中的生态功能及其意义。

2005-01-21 收稿, 2005-05-12 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 90102007)和新疆高技术项目(批准号: 200415113)联合资助

E-mail: chenyn@ms. xj. ac. cn

1 研究区域与样品采集

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠地处北纬 $44^{\circ}11' - 46^{\circ}20'$, 东经 $84^{\circ}31' - 90^{\circ}00'$ 之间, 面积 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$. 其中, 固定、半固定沙丘面积约占到沙漠总面积的 87%, 是中国最大的固定、半固定沙漠. 沙丘大致呈 NW-SE 走向, 大多高约 15—20 m, 沙丘表面的植被覆盖度变化在 15%—55% 之间, 属固定、半固定沙丘. 其中, 固定沙丘上的植物覆盖度可达 40%—55%、半固定沙丘为 15%—25%; 沙漠区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, 冬季降水较少; 年平均蒸发量在 2000 mm 以上, 年均气温 6—10°C, 极端高温为 40°C 以上, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温达 3000—3500°C; 研究区沙生植物中的小半乔木主要有梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 和白梭梭 *Haloxylon persicum*, 灌木和小半灌木, 有蛇麻黄 (*Ephedra distachya*), 沙拐枣 (*Calligonum leucocladum*), 沙蒿 (*Artemisia arenaria*), 白茎绢蒿 (*Seriphidium terrae ~ albae*) 等; 短命和类短命植物发育, 主要种有尖喙牻牛儿苗 (*Geraniaceae*)、线叶庭荠 (*Alyssum linifolium*)、中亚胡卢巴 (*Trigonella tenella*)、囊果苔草 (*Carex physodes*)、角茴香 (*Hypocoum parviflorum*)、独尾草 (*Eremurus anisopteris*) 和鹤虱 (*Lappula rupestris*)、小花糖芥 (*Erysimum cheiranthoides*) 等, 5 月份短命和类短命植物的平均盖度可达 40% 左右. 在沙丘底部或沙丘间低地广泛分布着以地衣植物为主的生物结皮, 其中还有微生物、藻类和苔藓植物等多种类型, 其组成和分布因环境而异, 是古尔班通古特沙漠除种子植物以外固定沙面的重要生物因子.

1.2 样品采集与测试

样地选择在生物结皮最为发育的古尔班通古特沙漠南部区域. 为了对沙丘不同部位生物结皮发生特点进行比较分析, 根据地形特点和生物结皮类型, 从沙丘上部、中部、下部至丘间低地, 对生物结皮的类型、盖度和厚度以及植被分布状况等内容进行了调查. 同时, 为了探讨和揭示准噶尔盆地荒

漠区不同下垫面条件下生物结皮的发生特点及其差异, 采集了古尔班通古特沙漠沙丘上、中、底部的土壤结皮样品和土壤剖面样品, 考虑到生物结皮发育对土壤的影响及其相互关系, 进行了分层采样, 采样深度 0—20 cm.

根据土壤国标分析方法, 对土壤样品进行了以下理化指标的测定: 土壤粒度用比重计法、土壤含水率用烘干法, 土壤有机质-重铬酸钾法 (GB9834—88), 土壤全氮用硫酸铜-硒粉扩散法 (GB7848—87), 土壤全磷用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法 (GB7852—87), 土壤全钾用氢氧化钠熔融-火焰光度计法 (GB7854—87), 土壤速磷用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法、土壤速氮用碱解-扩散法、土壤速钾用 1 mol/L NH_4Ac 浸提-火焰光度法. 土壤 pH 值用 PHS—2C 型数字式酸度计测定, 土壤电导率用 DDS—307 型电导率仪测定. 土壤全盐用重量法, 土壤水溶性盐中 CO_3^{2-} , HCO_3^- 用双指示剂滴定法、 Cl^- 用硝酸银滴定法、 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 用 EDTA 容量法, 钾离子 K^+ , Na^+ 用火焰光度法.

2 结果与分析

2.1 结皮发育的土壤理化特性

2.1.1 结皮土壤的机械组成 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠的物质组成以中沙以下的细粒成分为主, 占土壤颗粒物组成的 78.74%—94.56%. 其中, 沙丘不同地貌部位的土壤粒度特征不尽一致, 从沙丘上部、中部至沙丘下部或丘间低地, 土壤物质机械组成中的极细沙 ($< 0.25 \text{ mm}$) 以下成分逐渐增加, 而中沙和粗沙含量明显减少; 沙丘上部物质分选较好, 以中沙为主 (占 34.43%—40.15%), 沙丘中部以细沙成分 (30.48%—31.08%) 为主, 粗沙含量急剧减少, 沙丘底部或丘间低地则以极细沙为主, 粉沙和粘土含量明显增加, 达 15% 以上. 土壤物质机械组成的差异对土壤孔隙率、容重、含水率、渗透率、粘结性等方面有着直接的影响. 沉积物物质颗粒分选越差、平均粒径越小, 则土壤的渗透率也就越小^[8]. 并且, 细粒物质有可能导致颗粒之间的孔隙度下降, 形成有效渗透的屏障, 从而为生物结皮的生长发

育创造了条件^{[9]1)}。

2.1.2 土壤水分变化特征 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠土壤含水率的年内变化主要受气候条件的影响,不同季节沙丘表层土壤含水量变化较大。春季由于地表的积雪开始融化,加之春雨较多,土壤水分条件较好,且变化大;进入夏季以后,随着气温升高、降水减少以及植被生长耗水等,土壤含水量降低,但处于稳定少变状态^[10]。就个体沙丘而言,沙丘不同部位的土壤水分存在着明显差异(图1)。在沙丘上部,土壤含水量随土壤深度加大而增加,最高值出现在10—20 cm深度;在沙丘坡体的中下部,土壤含水量的最高值则出现在5—10 cm的深度,在沙丘底部或丘间低地,土壤含水量的最高值出现在土壤深度2—5 cm处的次表层,沙漠地区的生物结皮对有限降水入渗和土壤水分运移的影响是十分明显的^[11],然而,它们对不同深度土壤水分变化的影响还值得进一步研究。

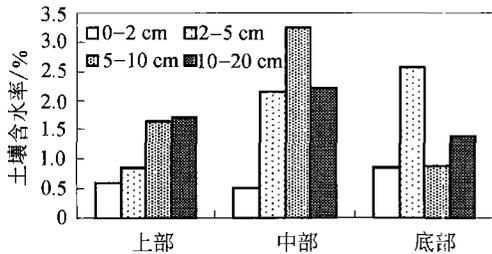


图1 沙丘不同部位土层深度的土壤含水率

2.1.3 土壤盐分和养分变化特征 古尔班通古特沙漠表层土壤易溶盐含量较低,介于0.02%—0.032%之间,并且存在从沙丘上部至下部加大的趋势,土壤盐分最高值出现在沙丘底部表层0—5 cm处。值得指出的是,土壤中交换性盐基中的Ca²⁺和K⁺的含量明显高于Na⁺和Mg²⁺,其中Mg²⁺含量最低,这可能与K⁺含量较高有关。研究表明,K⁺量的增加会导致Mg²⁺含量降低^[12]。而土壤胶体溶液中供交换性的阳离子不同,会对不同类型生物结皮生长造成影响,尤其对藻类结皮的生长和发育有直接影响。

古尔班通古特沙漠土壤中的有机质积累过程微弱,有机质含量较低,变化在0.078%—0.158%之间。就个体沙丘而言,从沙丘上部、中部至丘间低地,土壤表层的有机质含量分别为0.112%,0.123%和0.158%,呈增加的趋势。沙丘底部及丘间低地以风积作用为主,地表基质相对稳定,加之丘间低地在春季融雪和夏季降水期间的积水过程,对风积物质的分解和微生物的活动起到了一定的促进作用。并且,丘间低地广泛发育的土壤微生物结皮对改善土壤的养分状况也起到了重要作用^[13]。

2.1.4 土壤pH与电导率 土壤中的pH值对不同类型的结皮分布有一定影响^[14]。古尔班通古特沙漠土壤的pH呈碱性,介于8.43—8.66之间,其中,沙丘底部及丘间低地处的pH值略高于沙丘上部和中部(图2),但总体来说差异不大,说明土壤的淋溶非常有限。可见古尔班通古特沙漠的土壤生物结皮基本上处于碱化发育过程当中,其中,沙丘下部和丘间地结皮的碱化过程最为显著。土壤电导率变化在0.051—0.074 mS·cm⁻¹之间,沙丘底部及丘间低地的土壤电导率较高,与土壤盐分和pH变化存在基本相似的特点。

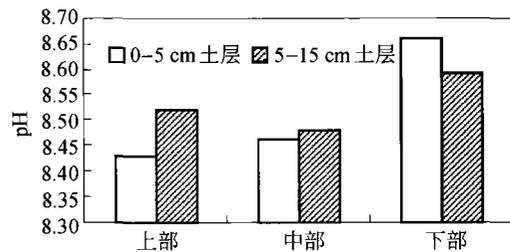


图2 沙丘不同部位土壤pH值比较

2.2 生物结皮的类型、分布与环境解释

2.2.1 生物结皮的类型与分布 在准噶尔盆地古尔班通古特沙漠中有多种类型的生物结皮,其中分布较广、发育较为普遍的有微生物种类、藻类、地衣和苔藓植物等^[15]。在微生物群落中,主要有细菌、放线菌、真菌等,以细菌和放线菌的数量为

1) Howarth L. The ecology of perennial moss species in chenopod shrublands of Middleback station. South Australia, B. sc. (hons) Thesis. Univ South Australia, 1983

多;以藻类为主的藻结皮主要有沼地微鞘藻(*Microcoleus paludosus*)、具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)和鞘丝异球藻(*Xenococcus lyngbyge*)等;地衣结皮主要有坚韧胶衣(*Collema tenax*)、红鳞网衣(*Psora decipiens*)、荒漠黄梅(*Xanthoparmelia desertorum*)和藓生双缘衣(*Diploschistes muscorum*)等;以苔藓植物为主的苔藓结皮主要有刺叶墙藓(*Tortula desertorum*)、绿色流苏藓(*Crassidium chloronotos*)、银叶真藓(*Bryum argenteum*)和泛生墙藓(*Tortula muralis*)等(表1)。由于个体沙丘不同部位环境条件的差异,由沙丘上部、中部至沙丘下部及丘间低地,不同类型生物结皮的发育演替与分异状况明显不同。

不同类型生物结皮自身发育特点和抗逆性的差异,导致了生物结皮在沙丘不同部位的分异特点。在古尔班通古特沙漠,就个体沙丘而言,不同类型生物结皮的分布位置是不同的。微生物群落是生物结皮的重要组成部分和先锋物种,存在于多种类型的生物结皮当中,从沙丘上部至丘间低地均有分布,其中在流动或半流动沙丘上部主要是微生物种

类,表明微生物种类对沙丘表面基质的变化有较强的适应性;藻结皮分布于沙丘两坡的上部和中部以及丘间低地等部位,其中,沙丘坡体中部有发育充分的藻结皮,其厚度虽然不大,但具有一定的抗侵蚀能力;地衣结皮在沙丘坡体上的分布位置较藻结皮低。由于地衣结皮的出现是以真菌和藻类的共存为前提,沙丘上部真菌和藻类的数量相对较少,地衣结皮分布极少,在沙丘坡体的中部、下部以及丘间低地,地衣结皮呈灰黑、棕色或黄色,成片发育,分布较广,是古尔班通古特沙漠的主要生物结皮类型;苔藓结皮主要分布于沙丘坡体的中下部以及丘间低地等部位,呈黑色、黑褐色和褐黄色。其中,无齿紫萼藓(*Grimmia anodon*)和垫状紫萼藓(*Grimmia pulvinata*)分布在沙丘坡体的中下部,而真藓(*Bryum argenteum*),细叶真藓(*Bryum capillare*)主要分布在丘间低地。沙丘间低地地势和缓,在春季融雪和夏季降水过程中易出现临时性积水,为生物结皮,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。因此,在古尔班通古特沙漠,丘间低地成为生物结皮发育最为完善的区域。

表1 古尔班通古特沙漠土壤生物结皮的种类及特点

结皮种类		分布位置与特点描述
微生物群落	细菌、放线菌、真菌	流动或半流动沙丘上部
藻结皮	沼地微鞘藻(<i>Microcoleus paludosus</i>)、具鞘微鞘藻(<i>Microcoleus vaginatus</i>)、鞘丝异球藻(<i>Xenococcus lyngbyge</i>)、鱼腥藻(<i>Anabaena azotica</i>)、马氏鞘丝藻(<i>Lyngbya martensiana</i>)、膨胀色球藻单生变种(<i>Chroococcus turgidus</i> var. <i>solitarius</i>)	沙丘坡体上部和中部 厚度:坡体上部 0.18—0.25 cm 坡体中部 0.25—0.50 cm 颜色:灰色、灰白色
地衣结皮	坚韧胶衣(<i>Collema tenax</i>)、红鳞网衣(<i>Psora decipiens</i>)、荒漠黄梅(<i>Xanthoparmelia desertorum</i>)和藓生双缘衣(<i>Diploschistes muscorum</i>)	沙丘坡体中下部、丘间低地 厚度:坡体上部 0.18—0.25 cm 坡体中部 0.25—0.50 cm 颜色:灰黑、棕色或黄色
苔藓结皮	刺叶墙藓(<i>Tortula desertorum</i>)、绿色流苏藓(<i>Crassidium chloronotos</i>)、银叶真藓(<i>Bryum argenteum</i>)和泛生墙藓(<i>Tortula muralis</i>)	沙丘坡体的中下部、丘间低地 厚度:坡体中部 0.6—1.2 cm, 丘间低地 1.5—3.5 cm 颜色:黑色、黑褐色、褐黄色

2.2.2 生物结皮与地表基质稳定性 地表稳定性和局地气候特征影响生物结皮的生成和发育^[16]。沙丘不同部位的地表基质稳定性是不同的,由沙丘上部至底部基质稳定性明显增强,这主要与沙丘上

部区域风蚀(风积)过程作用相对频繁和强烈有关。野外观测和风洞实验表明,在迎风坡,风速自沙丘中下部向沙丘上部是一个加强过程,至沙丘上部达到最大^[17,18]。风速的放大作用在于增加了沙丘迎风

坡上部区域的输沙率和沙面的活动性,从而导致表层基质的稳定性减弱.对古尔班通古特沙漠个体沙丘的观测表明,从迎风坡底部、中部至上部,输沙量由1.10, 5.26, 68.96 g增加至1982.75 g,沙丘顶部的输沙量约是丘间地带的2000倍,沙面活动主要集中于沙丘上部和顶部区域,沙丘上部风蚀平均深度达5.8 cm,顶部达8.65—19 cm^[19].而沙丘底部和丘间部位的地表基质处于相对稳定状态.从生物结皮的发育状况和分布密度看,由沙丘上部、中部至沙丘下部及丘间低地,生物结皮的平均厚度依次为0.05—0.1 cm, 0.2—0.5 cm, 3.5—5 cm和5—8 cm,覆盖度依次为30.5%, 48.5%, 55.5%和75.5%.表现出明显的发育程度加强、数量增多态势.此外,从藻结皮分布于风蚀较强、沙面基质稳定性较弱的沙丘坡体上部这一特点看,以藻类为主的结皮具有较强的抗逆性,对沙丘表面基质变化具有一定的适应能力.

2.2.3 生物结皮与植物群落变化 在沙丘不同部位,植物群落的种类组成、覆盖度和群落结构等是不同的,表现为在沙丘上部的流动、半流动沙面上,植物群落类型以三芒草植丛为主,伴生植物主要有虫实(*Corispermum* SP.),对节刺(*Horanowia ulicina*),鹤虱(*Lappula myosotis*),沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和小花糖芥(*Erysimum cheiranthoides*)等,但植被盖度较低,介于7.5%—13.5%之间.其中,羽毛三芒草(*Aristida Pennata*)等长营养期草本植物植被盖度小于7%,短命植物变化于1.5%—4.5%,生物结皮在这里分布极少,主要为微生物种类;在沙丘两坡中、上部,植物群落类型为白梭梭群落,有白梭梭(*Haloxylon persicum*),沙拐枣(*Calligonum leucocladum*),沙蒿(*Artemisia arenaria*),白茎绢蒿(*Seriphidium terrae ~ albae*)等,植被盖度为15.5%—28.5%.伴生植物主要有对节刺(*Horanowia ulicina*),簇花芹(*Soranthus meyeri*),角果藜(*Ceratocarum arenarius*),假狼紫草(*Nonea Caspica*),沙大戟(*Chrozophora sabulosa*),囊果苔草(*Carex physodes*),中亚胡卢巴(*Trigonella tenella*),角茴香(*Hypecoum parviflorum*),独尾草(*Eremurus anisopteris*)和鹤虱(*Lappula rupes-*

tris)等,在这里分布有发育较好的藻结皮,并且有地衣结皮出现;在沙丘坡体的中下部至丘间低地,植物群落类型与沙丘上部相比变化很大,主要为蛇麻黄植物群落,伴生植物有尖喙牻牛儿苗(*Geraniaceae*),线叶庭荠(*Alyssum linifolium*),囊果苔草(*Carex physodes*),东方早麦草(*Eremopyrum orientale*),鹤虱(*Lappula rupestris*)等.在沙丘下部和丘间低地植被盖度较高,为35%以上,这里是结皮类型最多、发育程度最高的区域,苔藓植物中的真藓(*Bryum argenteum*)和细叶真藓(*Bryum capillare*)主要分布在丘间低地的蛇麻黄低矮灌丛附近,植物体密集,呈斑块状成片分布.然而,在古尔班通古特沙漠,沙丘不同部位植被群落结构的变化与土壤生物结皮形成发育的相互关系尚不得而知,丘间低地广泛分布的苔藓和地衣植物在参与土壤生物结皮过程中对蛇麻黄植物群落发育演替的影响也有待于进一步探讨.

3 结论与讨论

(1) 沙丘不同部位的土壤理化性状影响土壤生物结皮的生长发育,而生物结皮具有改变土壤理化性质、影响地表水文和土壤养分循环的生态功能.就个体沙丘而言,土壤有机质含量由沙丘中部、下部至丘间低地增高的现象,可能与沙丘不同地貌部位环境条件以及土壤结皮形成过程中的微生物活动有关.苔藓和地衣植物在参与土壤生物结皮过程中,连续不断地在沙丘表面形成腐殖土壤,有效地促进了贫瘠土壤有机质的积累和土壤养分的提高.

(2) 沙丘不同部位地表基质的稳定性影响土壤生物结皮的生长发育.就个体沙丘而言,由上部至下部及丘间低地,生物结皮的发育程度加强、数量增多、厚度增大.生物结皮在沙丘不同部位的发育特点和分异变化是不同类型生物结皮对区域环境条件综合适应的一种生态表现和自然选择,与沙区生态条件有着极为密切的关系.并且,从藻类结皮、苔藓结皮和地衣结皮等三种类型生物结皮在沙丘不同地貌的分布和发育状况分析,藻类结皮的抗逆能力较苔藓和地衣结皮强.

(3) 生物结皮不同发育阶段的种类组成和演替与土壤、植被变化有着密切关系.通常在土壤结皮形成过程中,首先由藻类在沙漠植物的根际以及根

毛区开始生长,形成藻类根系结皮.随后,地衣植物开始生长,而地衣具有固氮的功能,当藻类和地衣植物对土壤结构、持水能力等有所改善后,便开始有苔藓植物生长^[20],而苔藓和地衣植物在参与土壤生物结皮形成过程中,不断地在沙丘表面形成腐殖土壤,有效地促进了土壤有机质的积累和土壤养分的提高.生物结皮的这种发育演替过程对土壤结构的形成起到了重要作用,它不仅有助于稳定沙丘表面,形成固定沙丘,而且为草本和木本植物形成和发育创造了条件^[1,21].在古尔班通古特沙漠,沙丘下部及丘间低地是生物结皮发育最好的区域,同时亦是植物生长相对较好、短命和类短命植物分布密集的地方,然而,其相互关系有待于进一步探讨.

参 考 文 献

- 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
- Belnap J, Harper K T, Warren S D. Surface disturbance of cryptobiotic soil crusts: Nitrogenase activity, chlorophyll content and chlorophyll degradation. *Arid Soil Res Rehabil*, 1994, 8: 1—8
- 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, 3: 139—145
- 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
- 李新荣,张景光,王新平,等. 干旱沙漠区土壤微生物结皮及其对固沙植被影响的研究. *植物学报*, 2000, 42(9): 965—970
- Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australia Journal of Soil Research*, 1994, 32: 389—415
- 张元明,曹同,潘伯荣. 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
- 朱朝云,丁同栋. *风沙物理学*. 北京: 中国林业出版社, 1991, 44—51
- Anderson R W, Calvin A. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands. In: Thornes J B. ed. *Vegetation and Erosion*. London: John Wiley, 1983, 385—389
- 赵从举,雷加强,王雪芹,等. 古尔班通古特沙漠腹地春季土壤水分空间分异研究. *干旱区地理*, 2003, 26(2): 154—158
- 李新荣,张景光,王新平,等. 干旱沙漠区土壤微生物结皮及其对固沙植被影响的研究. *中国沙漠*, 1999, 19(Supp.): 165—169
- Hunt M E, Floyd G L, Stout B B. Soil algae in field and forest environments. *Ecology*, 1979, 60(2): 362—375
- Bailey D, Mazurak P A, Rosowski J R. Aggregation of soil particles by algae. *J Phycol*, 1973, 9: 9—101
- Metting B. The systematic and ecology of soil algae. *Bot Rev*, 1981, 47: 295—312
- 张元明,潘惠霞,潘伯荣. 古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 61—66
- 李新荣,贾玉空,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—11
- 李志忠,关有志. 纵向沙丘和横向沙丘模拟流场的实验研究. *中国沙漠*, 1996, 16(4): 360—363
- 哈 斯,董光荣,王贵勇,等. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面气流与坡面形态的关系. *中国沙漠*, 1999, 19(1): 1—5
- 王雪芹,李丙文,张元明. 古尔班通古特沙漠沙垄表面的稳定性与顶部流动带的形成. *中国沙漠*, 2003, 23(2): 126—131
- 胡春香,张德禄,刘永定. 干旱区微生物结皮中藻类研究的新进展. *自然科学进展*, 2003, 13(8): 791—795
- Smith E P. Niche breadth, resource availability, and inference. *Ecology*, 1982, 63: 1675—1681