

人工防护林作用下风沙土成土过程的研究进展*

李从娟¹ 雷加强^{1†} 高培² 徐新文¹ 王永东¹ 范敬龙¹

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830011)

(2 新疆信息工程学校, 乌鲁木齐 830013)

摘要 人工防护林是防风固沙、有效防治沙漠化的重要措施之一。在沙漠地区建立人工防护林, 可以有效防止土壤侵蚀, 促进土壤有机质及黏粒积累, 促使地表结皮形成, 不仅对风沙起到了固定作用, 而且促进了风沙土的成土过程。本文结合植物-土壤相互作用理论, 分别从植物地上部分对养分的阻滞、聚集和减少土壤表面蒸发, 以及地下部分的固沙和物质的分解与营养补给等方面综述了生物防护林在风沙土成土过程中的作用。同时, 从以往的研究发现, 在风沙土成土过程中, 土壤机械组成变细, 比重和容重减小; 土壤剖面结构分异显著, 分层增加; 土壤含水量和养分显著聚集; 土壤微生物数量和种类增加, 活性增强, 酶活性也大幅度提高。总之, 随着沙漠生物防护林的建造, 林下风沙土性质发生了明显的改良作用, 逐渐发展成固定风沙土。说明人工防护林和风沙土的成土过程是协同发展的, 这不仅有利于沙漠防护林的可持续管护, 也有利于沙漠化的防治和退化生态系统的恢复与重建。

关键词 人工防护林; 风沙土; 成土过程

中图分类号 S151 **文献标识码** A

土壤是生态系统诸多生态过程(如营养物质循环、水平衡、凋落物分解)的参与者与载体, 是植物生长的基础。土壤结构与养分状况对于植物的生长起着关键性作用, 直接影响植物群落的组成与生理活力, 决定着生态系统的结构、功能和生产力水平^[1-2]。植物的生长发育对土壤环境也有一定的反馈作用, 植物凋落物的分解以及根系分泌物、根际微生物的积累, 使土壤性状及土壤中各种生物化学循环发生改变, 进而促进了土壤的发育和演变^[3-5]。沙漠化是当今世界人类面临的最严重环境问题, 人工防护林固沙已成为沙漠化治理的重要手段^[6]。人工防护林的营建, 使得原来以流动沙丘为主的沙漠景观演变成了一个复杂的人工-天然荒漠生态系统。降尘、降水等输送的物质对土壤质地变化产生的影响, 以及植物对土壤的反馈作用, 加速了土壤中各种物质的转化^[7], 从而改善了土壤的营养条件, 其化学、物理、生物、形态和矿物等内外属性也发生相应变化, 促使风沙土向成土方向发展, 进而转变为半固定风沙土和固定风沙土^[8]。因此, 研究防护林作用下风沙土成土的机理及演变过程, 对荒

漠生态环境的恢复以及沙漠化防治具有非常重要的现实意义。

1 植物对风沙土成土的作用

1.1 地上部分对风沙土成土的作用

1.1.1 阻滞和聚集养分 在干旱严酷的荒漠生境下, 植物对生态环境具有很强的适应性, 荒漠植物的树冠结构及其叶片的表面特点为大气降尘在叶及枝干表面的积累提供了有利条件^[9]。而大气降尘或植物叶子分泌物中含有许多营养物质, 这些物质由树冠截留降雨形成的树干径流运至灌木根颈周围的土壤中, 在灌木根颈周围形成“肥岛”。而“肥岛”的形成, 增加了该区域土壤的养分含量和水分含量^[10], 进而为微生物提供良好的生活环境, 促使土壤性状向良性方向发展。因此, 在干旱的沙漠环境中, 植物地上部分对营养物质的阻滞作用有利于风沙土的发育和成土演变。

Klemmedson 和 Barth^[11]对沙漠生态系统中植物生物量分配与养分分配关系的研究发现: 单株乔木

* 国家自然科学基金重点项目(41030530)、新疆维吾尔自治区重大科技专项(201130106-3)、中国科学院西部博士专项(XBBS200904, XBBS200905, XBBS200908)和中国石油塔里木油田公司科技项目(971010050002)联合资助

† 通讯作者, E-mail: desert@ms.xjb.ac.cn

作者简介: 李从娟(1982—), 女, 陕西渭南人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态学研究。E-mail: li_congjuan@163.com

收稿日期: 2011-11-22; 收到修改稿日期: 2012-04-05

的冠幅下土壤养分含量大于周围地区,他们将这种土壤养分聚集于乔木下的现象称为“肥岛”(fertile islands),并且确立了“肥岛”的结构特征。植物枯落物和有机残体的积累是“肥岛”土壤有机质和其他养分资源的主要来源。对科尔沁沙地的几种灌木和半灌木的“肥岛”效应的研究表明:在研究区灌丛下土壤有机碳、全氮和全磷分别较灌丛间地高56%、51%和37%,土壤电导率提高了56%,但pH并无明显变化^[4]。

1.1.2 减少土壤蒸发 防护林可以有效降低风速、遮蔽阳光,因此可以减少土壤表面的水分蒸发,保持土壤湿度,使土壤中物质的分解作用不断进行^[12]。Lomas 和 Schlesinger^[13] 和 Messing^[14] 的研究表明,在防护林背风面,土壤蒸发可以降低35%。Miller 等^[15] 在持续6天的土壤蒸发的测量中发现,在防护林的背风面,土壤蒸发平均减小了20%。Wang 等^[16] 的研究发现,在大尺度的防护林网内,整个区域的土壤蒸发降低了14%。Hipsey 和 Sivapalan^[17] 也发现在一个大约3 600 m²的小堤坝上种植高约8 m的防护林树种,可以有效降低30%的土壤蒸发。总之,生物防护林的建设,不仅能改善林下风沙土的养分条件及微生物性状,同时可以减少土壤蒸发、保持土壤湿度。

1.2 地下部分对风沙土成土的作用

1.2.1 根系的固沙作用 防护林根系和根际在风沙土成土过程中的作用主要体现在:植物的根部和根系可以固土,防止水土流失;在沙漠地区,植物根系可以保持水土,避免及减少土壤表面层的沙化及流失。植物的活根提供分泌物,死根提供有机质,作为土壤团粒的胶结剂,同时配合须根的穿插挤压和缠绕的作用,为提高土壤的抗侵蚀性能提供了很好的保证^[18]。李勇等^[19] 在南方紫色土区对3~9 a人工刺槐林改善紫色土结构的作用进行了定量分析研究,证实了根系可以有效改善土壤的团粒结构。杨亚川等^[20] 曾在1996年提出了“土—根复合体”的概念,从工程力学角度揭示了这种复合体的实质,即根系具有加筋作用,并不等于真正的钢筋,根系在土壤中进行生长发育属于活性材料,同时根与土粒之间形成统一体。因此,对于提高土壤的抗侵蚀性有重要作用。

1.2.2 物质的分解与营养补给作用 植物地上部分可以将植物光合作用的产物以根系分泌物和植物残体形式释放至土壤,供给土壤有机养分和能源,同时,地下部分的根际土壤微生物则将有机养

分分解或转化成无机养分,以利于植物吸收利用^[21]。根系和根际微生物共存于土壤介质中是相互作用、相互影响的。一方面,根际微生物的活动和代谢作用影响根系营养物质的吸收和根系分泌物的释放;另一方面,根系分泌物为微生物生长繁殖提供了碳源和能源,有利于微生物的生长发育,进而会影响土壤中各种物质的分解和转化^[22]。赵小亮等^[23] 的研究发现,棉花根系分泌物能使土壤中细菌的数量明显增加,并表现出低浓度抑制、中高浓度促进的效应。苏永中和赵哈林^[4] 对科尔沁沙地广泛分布的几种灌木和半灌木的根际效应的研究表明:灌木根际土壤较非根际土壤有机碳和全氮分别高76%和54%,根际土壤pH降低0.19个单位,电导率提高了2倍~3倍,但土壤全磷并无显著变化;当然,根际中土壤养分的聚集必将引起灌丛下土壤养分的聚集。

1.3 地上部分和地下部分的共同作用

植物地上部分和地下部分对于土壤的发育演变不是单独作用的,而是共同作用的。灌丛“肥岛”的形成有利于根系的生长,导致更多的根际沉积,而根系的生长繁殖提高了地上部分生物量,反之会给土壤产生更多的植物凋落物和阻滞营营养物质。沙漠流沙地建立人工防护林后,沙土表层形成风积物结皮,慢慢演变形成以藻类为优势种的微生物结皮,这主要由于沙物质得到固定后,大气降尘和粉粒在沙表层堆积、下沉,再经雨滴的冲击和灌溉等物理作用和土壤微生物的活动共同作用在土壤中富集^[24]。

2 风沙土的成土过程

成土过程也叫土壤的形成过程,是指在各种成土因素的综合作用下,土壤的发生发育过程。它是土壤各种物理、化学和生物作用的总和,包括岩石的崩解、矿物质和有机质的分解合成,以及物质的淋失、淀积、迁移和生物循环等^[25]。风沙土是发育于风成沙性母质的土壤,其形成过程与流动沙性母质上自然植被的出现、繁衍和演变紧密相关。当由流动性沙性母质构成的沙丘上出现稀疏的植物时,风沙土的成土过程即告开始。植物通过根系及其地上部分对沙性母质产生固结作用和表面覆盖作用,减弱沙性母质的流动性;植物残体转变为腐殖质,也使沙性母质的物理、化学和生物性质发生变化并使之发生土壤分层^[26]。

风沙土的形成始终贯穿着沙化的风蚀过程和植被固沙的生草化过程,这两者互相对立而往复循环以推动着风沙的形成与变化,成土过程很不稳定,土壤发育十分微弱。风沙土的形成大致分为三个阶段。(1)流动风沙土阶段:风沙母质含有一定的养分和水分,为沙生先锋植物的滋生提供了条件,但因风蚀和沙压强烈,植物难以定居和发展,生长十分稀疏,覆盖度小于10%,常受风蚀移动,土壤发育极其微弱,基本保持母质特征,处于成土过程的最初阶段;(2)半固定风沙土阶段:随着植物的继续滋生和发展,覆盖度增大,常在10%~30%之间,风蚀减弱,地面生成薄的结皮或生草层,表层变紧,并被腐殖质染色,剖面开始分化,表现出一定的成土特征;(3)固定风沙土阶段:植物进一步发展,覆盖度继续增大,通常大于30%,除沙土植物外,还渗入了一些地带性植物成分,生物成土作用较为明显,土壤剖面进一步分化,土壤表层更紧,形成较厚的结皮层或腐殖质染色层,此外,土壤有机质有一定的积累,细土粒增加,理化性质有所改善,具备了一定的土壤肥力。

3 风沙土成土过程中土壤性质的变化

3.1 物理性质的变化

3.1.1 机械组成 流沙固定过程中,成土环境的改变导致物质循环过程加强,地表覆盖度增大,增加了地表粗糙度,降低了风速,减弱了风沙流活动,以致地面不断积累枯枝落叶、沉积尘埃等。同时由于生物作用(尤其是根系分泌物及蓝绿藻和地衣等隐花植物出现)及有机残体的积累和微生物作用,随着时间的延续使流沙地的生态条件产生了一系列的变化,共同促进了地表有机结皮的形成和土壤的发育^[3,5]。随着防护林植物的建植,风沙土的物理性质发生了明显的改良,其机械组成明显变细,土壤比重和容重明显减小,孔隙度则增大。

贾晓红等^[3]对流沙固定过程中土壤性质变异的初步研究表明:植被建立后的固沙区土壤粉粒(0.05~0.001 mm)和黏粒(<0.001 mm)成分在各层含量均高于流沙,这种变化在结皮层尤为明显。肖洪浪等^[27]在沙坡头研究发现,土壤机械组成随固沙时间增加而明显变细,人工植被引入10 a后粉粒含量是流沙的156.8倍,40 a后是流沙的226.0倍。相应地,黏粒含量是流沙的15.17倍和12.8倍。苏永中等^[28]在科尔沁沙地奈曼旗的研究得出,流动沙

丘经小叶锦鸡儿多年固定,土壤表层黏粉粒含量随种植年限的增加而显著增加。张华等^[29]在科尔沁沙地的研究也发现,防沙林及其临近区域具有很强的滞尘效应,降尘中的粉、黏粒含量极高。在沙坡头地区,固定沙丘的容重为 1.45 g cm^{-3} ,较流沙低 0.19 g cm^{-3} ,孔隙度为45.7%,较流沙增加6.9%^[6]。人工植被营建后,沉积的粉粒、黏粒物质,还有一些碳酸盐和二氧化硅,随降水淋溶渗透,失水后与周围物质胶结在一起,有助于形成生物结皮^[30]。民勤沙区绿洲中土壤结皮与自然裸沙地相比,黏粒含量显著增加,且随着人工植被建立时间的增长,比重和容重随种植时间的增长而减小,孔隙度则增大^[31]。

3.1.2 剖面结构 流沙地不存在剖面结构上的分异,仅有A层(有机质层)和C层(母质层),缺乏B层(淀积层)。由于风蚀和沙埋作用的影响,风沙土的成土过程经常被打断,其发育长期停留在幼年状态,剖面上不存在分层现象^[32]。而在流沙上建立植被后,沙土表面一般会形成明显的结皮层,并且随着植被建立时间增长,结皮厚度也逐渐增厚。结皮层之下是流动沙丘固沙前沙土表面沉积的物质所形成,厚度可达15~20 cm,有较多的植物根系集中在该层。在长期的成土过程中,腐殖质、细土物质和矿物元素迁移和淋溶,使得该层肥力明显高于流沙^[27]。同样,对于沙坡头地区风沙土剖面结构的研究表明,由于人工植被的建立,流沙地土壤剖面的性质也发生分化,土壤分层增加^[3]。肖洪浪等^[33]对沙坡头地区风沙土的研究表明,在没有人工植被的腾格里沙漠东南缘,流动风沙土处于成土的最初阶段,整个剖面由均一而疏松的黄棕色细沙构成;而在人工植被建立的固沙区内,随粉尘沉积和生物成土过程的发展,风沙土表现出显著的剖面形态特征,可明显划分出结皮层、过渡层和原始流沙层。对塔克拉玛干沙漠人工防护林地的研究也发现,由于植被建立时间较短,虽然林地土壤剖面分异不明显,但较流动风沙土已经在颜色上发生了微弱的变化^[34]。同时,由于塔克拉玛干沙漠公路防护林采用高矿化度地下水滴灌,在防护林带表层形成明显的盐结皮。然而,盐结皮的盐分含量很高,硬度较大,具有很强的抗风蚀能力^[35],可见,盐结皮的形成对于风沙土表面的固定有极为重要的意义。

3.1.3 水分含量 流沙地区降水少,渗透快,表面蒸发强,土壤含水量低。随着流沙地的固定,风沙土比重、容重减小,而孔隙度增加,其透水性减慢,持水量增加。在沙坡头地区,建立植被后,固定

沙丘田间持水量在 0~0.8 cm 层为 20.3%, 在 0.8~7 cm 层为 9.9%, 较流沙地高 2 倍~5 倍, 说明人工植被的建立有利于增加土壤的持水力^[6]。流沙地固定后, 风沙土的毛管持水量, 饱和持水量、最大吸湿量、凋萎湿度均较流沙区增大^[36]。对塔里木沙漠公路防护林地盐结皮土壤蒸发的研究表明, 盐结皮层对土壤水分蒸发有明显的抑制作用, 且抑制效率自表层向下层土壤逐渐降低, 其抑制效率在表层、0~5 cm、5~15 cm 和 15~30 cm 土层分别达到了 46.43%、40.95%、19.29% 和 15.80%^[35]。

3.2 化学性质的变化

3.2.1 养分含量 固沙区土壤-植被系统的演变, 地表土壤温度、水分、微生物繁殖和生化活性等的改变, 加速了土体中的各种生物化学反应和矿物分解过程, 丰富了植物的营养条件。而地表的固定保证了大气过程(如降尘、降雨等)所携带养分的保存及大量植物细根和未分解凋落物等在浅表层的聚集^[3]。由于人工林地对土壤化学性质和水热条件的改善、树木根系活动以及枯落物分解, 土壤微生物数量和酶活性显著增加, 并导致土壤肥力得到很大提高^[37]。在沙坡头地区, 固定沙丘 0~0.8 cm 的结皮层有机质含量为 1.62%, 0.8~7 cm 层为 0.59%, 较流沙分别高 23 倍和 8 倍, 人工植被区的全氮和速效氮分别为流沙的 5 倍~10 倍和 2 倍~6 倍^[6]。许林书和许嘉巍^[7]在吉林观测到, 沙丘固定前, 风沙土有机质在 0.1%~0.5% 之间, 沙障成林后, 平均增至 1.0%。黎承湘和安志如^[8]的研究发现, 生草固定沙区的氮、磷、钾分别为流沙区的 2.38 倍、2.08 倍、1.12 倍, 26 年的樟子松固定沙区的氮、磷、钾分别为流沙区的 2.18 倍、2.59 倍、1.16 倍。对塔克拉玛干沙漠公路防护林风沙土的研究发现, 土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效磷等含量均随着防护林种植年限的增加呈显著增加趋势^[38]。

3.2.2 pH 和盐分 随着流沙固定过程中植物微生物的活动、水文和盐分淋溶过程的巨大变化, 土壤 pH 也发生了较大变化, 主要发生在结皮层和 0~5 cm 层, 其中结皮层 pH 较其下土层和流沙的各层低, 但酸化程度较弱; 0~30 cm 层土壤 pH 高于流沙区, 在垂直方向 pH 随深度有升高的趋势^[3]。贾宝全等^[31]对民勤沙区不同结皮的土壤盐分分析发现, 总盐量以丘间地结皮和红柳结皮最大, 而红柳结皮含盐量高可能与其生物泌盐特性密切相关。对塔克拉玛干沙漠人工防护林地的研究表明, 由于采用高矿化度水进行灌溉与强烈的蒸发作用, 塔里木沙

漠公路防护林土壤盐分表聚性强, 表层盐分含量明显高于林木根系分布层^[39]。张建国等^[36]对塔里木沙漠公路防护林土壤盐结皮的研究表明: 咸水滴灌下防护林内土壤盐结皮层 pH 均呈碱性, 且随着防护林定植年限的增加而逐渐降低。

3.3 微生物和酶活性的变化

3.3.1 微生物 土壤微生物的组成及数量分布受环境综合因素的影响, 可作为土壤质量变化的指标^[40]。在土壤成土过程中土壤微生物是最活跃的因子, 几乎与所有土壤发育过程有关, 它是土壤有机质和土壤养分转化和循环的主要动力, 参与有机质的分解、腐殖质的形成、植物养分的转化和循环等各个生化过程。人工植被的建立改变了土壤和近地层空气的温度和湿度, 使微气候向有利于微生物活动的方向发展, 同时, 随着流动沙丘的固定, 植物种类增加, 生产力逐渐提高, 土壤养分和水分含量增高, pH 降低, 微生物数量和种类也逐渐增多, 其活性增强, 对风沙土的发育起到积极作用^[32]。陈祝春和李定淑^[41]在科尔沁沙地的研究表明, 各类群微生物在固沙造林沙丘一般较流动沙丘繁殖旺盛, 各造林沙丘的细菌数量比流沙高出 2.3 倍~6 倍。顾峰雪等^[32]的研究表明由流动风沙土到固定风沙土, 结皮层变厚, 各类微生物和生理群数量和生物量均呈增加趋势。邵玉琴和赵吉^[42]对沙坡头人工植被固沙结皮层土壤微生物的研究, 发现土壤微生物数量随着人工植被栽植年代的增加而逐渐增加, 沙坡头流动沙地总微生物数量分别相当于 1956 年、1964 年、1982 年固沙区的 4.93%、8.23% 和 48.28%。周智斌和李培军^[43]对塔克拉玛干沙漠人工防护林地土壤微生物的研究表明, 塔里木沙漠公路防护林建成后, 土壤微生物的活性大幅度提高。土壤细菌、放线菌和真菌数量自上而下急剧减少, 表层土壤中微生物数量最多。这是因为表层土壤中有有机质丰富, 土壤结构疏松, 为微生物活动提供了良好的营养和通气条件, 其土壤热值状况较下层好, 利于微生物生长繁殖。靳正忠等^[44]对极端干旱区防护林地土壤微生物的研究表明, 塔里木沙漠公路防护林的建设促进了风沙土土壤微生物的发育, 土壤微生物数量随着防护林定植年限的增加而增加。

3.3.2 酶活性 土壤酶活性具有相对的稳定性, 经常作为土壤微生物生长和活性的指标^[3]。土壤酶活性随土壤剖面深度增加而降低, 与微生物的分布相一致。陈祝春和李定淑^[41]的研究表明: 固定沙丘、沙地的结皮层或表层土壤酶活性最强, 半固定

沙丘,沙地的结皮层或表层居中,流动沙丘最低。且酶活性与造林时间成正比,这与微生物数量的研究结果相一致,并且固定沙丘结皮层的土壤酶活性较下层土壤酶活性强,这说明在流沙地建设防护林增强了土壤酶活性。周智彬^[38]和靳正忠^[44]等在塔克拉玛干沙漠腹地地区研究也发现,人工绿地建成后,随着土壤结构和养分状况的改善,土壤酶活性大幅提高,并且在时间和空间分布上呈现明显的规律性,土壤酶活性与土壤有机质含量呈正相关。

4 存在问题与展望

综上所述,沙漠人工防护林的建造,必将引起林下风沙土质量的改变。随着防护林植物的生长、其凋落物和根系分泌物的累积,以及防护林对大气沉降的吸附作用,林下风沙土性质发生了明显的改良作用。风沙土在机械组成、水分、养分和微生物等方面均有了一定程度的改善,逐渐发展成固定风沙土。这说明在植物-土壤相互作用理论下,人工防护林和风沙土的成土过程是协同发展的,这不仅有利于沙漠防护林的可持续管护,也有利于沙漠化的防治和退化生态系统的恢复与重建。

4.1 建立风沙土成土模型

以往研究主要集中在土壤物理化学和微生物学特性的描述上,而对于风沙土的演变过程缺乏深入研究,因此,以后的研究应该以风沙土的演变过程为重点,并将风沙土成土过程数量化,进而建立风沙土的成土模型。通过建立模型更能接近真实的土壤发生、演变过程。近年来,国内外不少学者将模型研究引入成土过程,通过模型方法定量研究成土过程^[45-47]。但这些模型法尚未运用到风沙土的成土过程中,尤其是定量研究各种成土因素及其相互作用对土壤形成和发育的影响。此外,过去的研究大多从自然条件下描述其成土过程,而人为作用对成土过程的影响一直被忽视。有研究指出,沙丘固定 100 年后可形成 7.5 cm 厚的土壤层,但在人为影响下,土壤形成速率可达到 $6.2 \sim 13.4 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[48]。因此,研究风沙土的形成过程,尤其要考虑到人为因素对风沙土发育和演变的影响。从人工影响下防护林土壤物理、化学、生物等方面,综合分析人工防沙工程土壤演变的相互作用机理及驱动机制,构建风沙土土壤的成土模型。同时,关于成土速率及成土过程在以后的研究中要侧重于模型方法的完善和测定结果的准确性上,不能局限于土壤内部的

物理、化学、生物性质,还应将当地的社会、经济、生态各个方面有机结合,使得计算的结果更加科学。此外,由于风沙土的演变过程极为缓慢,其物理、化学及生物学属性的变化范围相对较小,因此,无论在样品的采集及分析过程中,应选择精密度较高的仪器。

4.2 加快风沙土的成土演变过程

综合上述国内外关于人工防护林作用下风沙土成土及演变的研究发现,风沙土的成土过程极为缓慢,而且受多种自然因素的影响,为了加快风沙土的发育和成土过程,可以采取以下几个措施:(1)人工促进土壤结皮及生物结皮的生长和恢复,这对风沙土的表面固定有重要作用;(2)提高生物多样性,因为单一的植物群落结构,土壤的生物化学地球循环缓慢,所以可以通过提高生物多样性来加快土壤的生物化学地球循环和物质转换,进而提高风沙土的成土速率;(3)充分利用有限的水资源,水分条件是沙漠地区植物生长的限制因子,因此,充分利用沙漠地区的地下水资源,改善土壤的水分状况,一方面有利于防护林植物的生长,另一方面可以加速土壤中的各种物质循环,进而可以加快风沙土的成土过程。

参 考 文 献

- [1] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, et al. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247: 1 043—1 048
- [2] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77:364—374
- [3] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 等. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4):46—50. Jia X H, Li X R, Wang X P, et al. Primary study of spatial heterogeneity of soil property in processes of shifting sand fixation in southeaster Tengger Desert (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4):46—50
- [4] 苏永中, 赵哈林. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 802—806. Su Y Z, Zhao H L. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7): 802—806
- [5] 孟林, 赵雨森. 生物固沙对土壤植被的影响. *防护林科技*, 2005, 69(6):38—41. Meng L, Zhao Y S. The effects of bictic stabilization of sands on plant and soil (In Chinese). *Protection Forest Science and Technology*, 2005, 69(6):38—41
- [6] 陈文瑞. 沙坡头地区固沙过程土壤性质的变化. *中国沙漠*, 1981, 1(1):40—48. Chen W R. Change of soil properties on the process of stabilization sands in Shapotou (In Chinese). *Chi-*

- nese Journal of Desert, 1981, 1(1): 40—48
- [7] 许林书, 许嘉巍. 沙障成林的固沙工程及生态效益研究. 中国沙漠, 1996, 16(4): 392—396. Xu L S, Xu J W. Sand fixation project with forest sand barrier and its ecological benefit (In Chinese). Chinese Journal of Desert, 1996, 16(4): 392—396
- [8] 黎承湘, 安志如. 固沙造林改良风沙土的效果. 中国沙漠, 1984, 4(1): 42—50. Li C X, An Z R. The effects of stabilization sand with shelter belt (In Chinese). Chinese Journal of Desert, 1984, 4(1): 42—50
- [9] 唐艳, 刘连友, 屈志强, 等. 植物阻沙能力研究进展. 中国沙漠, 2011, 31(1): 43—48. Tang Y, Liu L Y, Qu Z Q, et al. Research review of capacity of plant for trapping blown sand (In Chinese). Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 43—48
- [10] Li C J, Li Y, Ma J. Spatial heterogeneity of soil chemical properties at fine scales induced by *Haloxylon ammodendron* (Chenopodiaceae) plants in a sandy desert. Ecological Research, 2011, 26(2): 385—394
- [11] Klemmedson J O, Barth R C. Distribution and balance of biomass and nutrients in desert shrub ecosystems. US/IBP Desert Biome Research Memo. Logan: Utah State University Press, 1975: 75—75
- [12] Helfer F, Zhang H, Lemckert C J. Evaporation reduction by windbreaks: Overview, modelling and efficiency. Urban Water Security Research Alliance Technical Report No. 16. 2009
- [13] Lomas J, Schlesinger E. The influence of a windbreak on evaporation. Agric Meteorol, 1971, 8: 107—115
- [14] Messing I, Afors M, Radkvist K, et al. Influence of shelterbelt type on potential evaporation in an arid environment. Arid Soil Res Rehab, 1998, 12: 123—138
- [15] Miller D R, Rosenberg N J, Bagley W T. Soybean water use in the shelter of a slat-fence windbreak. Agric Meteorol, 1973, 56: 209—215
- [16] Wang H, Takle E S, Shen J M. Shelterbelts and windbreaks: Mathematical modelling and computer simulations of turbulent flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33: 549—586
- [17] Hipsey M R, Sivapalan M. Parameterizing the effect of a wind shelter on evaporation from small water bodies. Water Resour Res, 2003, 39: 1—9
- [18] Akram M, Ashraf M Y, Ahmad R, et al. Effect of root-zone salinity and form of N on photosynthate partitioning in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30: 855—861
- [19] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 1—7. Li Y, Wu S X, Xiahou G F. Stabilization of soil structure by roots of artificial locust trees in purple soil region (In Chinese). Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(2): 1—7
- [20] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31—38. Yang Y C, Mo Y J, Wang Z F, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite (In Chinese). Journal of China Agricultural University, 1996, 1(2): 31—38
- [21] 李从娟, 李彦, 马健, 等. 干旱区五种植物根际土壤养分状况的对比研究. 干旱区地理, 2011, 34(2): 222—228. Li C J, Li Y, Ma J, et al. Nutrition in the rhizosphere of five xerophytic plants (In Chinese). Arid Land Geography, 2011, 34(2): 222—228
- [22] Marschner P, Timonen S. Interactions between plant species and mycorrhizal colonization on the bacterial community composition in the rhizosphere. Applied Soil Ecology, 2005, 28(1): 23—36
- [23] 赵小亮, 刘新虎, 贺江舟, 等. 棉花根系分泌物对土壤速效养分和酶活性及微生物数量的影响. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1 426—1 431. Zhao X L, Liu X H, He J Z, et al. Effects of cotton root exudates on available soil nutrition, enzyme activity and microorganism quantity. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(7): 1 426—1 431
- [24] 马风云, 李新荣, 张景光, 等. 沙坡头固沙植被若干土壤物理因子的空间异质性研究. 中国沙漠, 2005, 25(2): 207—215. Ma F Y, Li X R, Zhang J G, et al. Spatial heterogeneity of soil physical properties in Shapotou artificial sand-fixing vegetation area (In Chinese). Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 207—215
- [25] 李渝, 蒋天明, 魏朝富. 风化土速率计算模型的研究进展. 土壤通报, 2010, 41(5): 1 252—1 256. Li Y, Jiang T M, Wei C F. Progress on calculation models of soil weathering rates (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5): 1 252—1 256
- [26] 单娜娜, 赖波. 风沙土成土演变过程中土壤微生物生物学特性研究进展与展望. 新疆环境保护, 2004, 26(增刊): 79—82. Shan N N, Lai B. Study progresses and prospect on the ecological characteristics of soil-inhabiting microorganism in soil forming process of aeolian sand soil (In Chinese). Environmental Protection of Xinjiang, 2004, 26 (suppl): 79—82
- [27] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变. 中国沙漠, 2003, 23(6): 605—611. Xiao H L, Li X R, Duan Z H, et al. Succession of plant-soil system in the process of mobile dunes stabilization (In Chinese). Journal of Desert Research, 2003, 23(6): 605—611
- [28] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性. 植物生态学报, 2004, 28(1): 93—100. Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, et al. Characteristics of plant community and soil properties in the plantation chronosequence of *Caragana microphylla* in Horqin sandy land (In Chinese). Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(1): 93—100
- [29] 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征. 水土保持学报, 2002, 16(2): 20—23. Zhang H, Li F R, Zhang T H, et al. Wind sand flow structure and its variation under different surface conditions in Korqin sandy land (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 20—23
- [30] Aderikhin P G, Bogatyreva Z S. Effect of forest shelter belts on the structure of ordinary chernozems in Kamennaya steppe USSR.

- Pochvovedenie, 1979, 2: 71—81
- [31] 贾宝全, 张红旗, 张志强, 等. 甘肃省民勤沙区土壤结皮理化性质研究. 生态学报, 2003, 23(7): 1 442—1 448. Jia B Q, Zhang H Q, Zhang Z Q, et al. The study on the physical and chemical characteristics of sand soil crust in the Minqin County, Gansu Province (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1 442—1 448
- [32] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣. 人工植被下风沙土演变研究综述. 干旱区研究, 1999, 16(2): 67—70. Gu F X, Wen Q K, Pan B R. Review on eolian sand soil development trend research under impact of artificial vegetation (In Chinese). Arid Zone Research, 1999, 16(2): 67—70
- [33] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤——植被系统演变对水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(6): 809—814. Xiao H L, Li X R, Duan Z H, et al. Impact of evolution of plant-soil system on the water environment during the mobile dunes stabilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 809—814
- [34] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地风沙土的土壤酶活性研究. 中国沙漠, 2000, 20(3): 293—297. Gu F X, Wen Q K, Pan B R, et al. Research on soil enzyme activities of aeolian soil under artificial plantation in Taklimakan Desert heartland (In Chinese). Journal of Desert Research, 2000, 20(3): 293—297
- [35] 张建国, 孙树国, 徐新文, 等. 塔里木沙漠公路防护林土壤盐结皮化学特征及其对土壤蒸发的影响. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 174—179. Zhang J G, Sun S G, Xu X W, et al. Chemical characteristics and its effect on soil evaporation of soil salt crusts in the Tarim Desert highway shelterbelts (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 174—179
- [36] 张继贤. 沙坡头地区风沙土的水热状况. 中国沙漠, 1997, 17(2): 154—158. Zhang J X. Water and heat condition of blown sand soil in Shapotou region (In Chinese). Journal of Desert Research, 1997, 17(2): 154—158
- [37] 焦树仁. 沙地人工林凋落物、腐殖质及微生物的研究. 东北林业大学学报, 1989, 17(4): 10—17. Jiao S R. Litters, humus and microorganism in sand-fixing forest (In Chinese). Journal of Northeast Forestry University, 1989, 17(4): 10—17
- [38] 周智彬, 徐新文. 塔里木沙漠公路防护林土壤酶分布特征及其与有机质的关系. 水土保持学报, 2004, 18(5): 10—14. Zhou Z B, Xu X W. Distribution characteristics of soil enzymes of Talimu Desert Highway Shelter-forest and their relations with soil organic matter (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 10—14
- [39] 王永东, 徐新文, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路生态防护林沿线土壤表层盐分特征. 干旱区研究, 2010, 27(1): 51—56. Wang Y D, Xu X W, Lei J Q, et al. Analysis on properties of topsoil salinity a long the shelterbelts of the Tarim Desert Highway (In Chinese). Arid Zone Research, 2010, 27(1): 51—56
- [40] 邵玉琴, 赵吉. 草原蘑菇圈中土壤微生物类群数量的动态分布研究. 中国草地, 2000(1): 47—50. Shao Y Q, Zhao J. Study of dynamic distribution of soil microbial number of the fairy ring in Steppe (In Chinese). Grassland of China, 2000(1): 47—50
- [41] 陈祝春, 李定淑. 科尔沁沙地奈曼旗固沙造林沙丘土壤微生物区系的变化. 中国沙漠, 1992, 12(3): 16—21. Chen Z C, Li D S. Microflora variations of afforested sand dune soil in Naiman banner, Horqin sandy land (In Chinese). Journal of Desert Research, 1992, 12(3): 16—21
- [42] 邵玉琴, 赵吉. 不同固沙区结皮中微生物生物量和数量的比较研究. 中国沙漠, 2004, 24(1): 68—71. Shao Y Q, Zhao J. Comparative research on microbial biomass and number in soil microbiotic crust of different fixing sand dunes (In Chinese). Journal of Desert Research, 2004, 24(1): 68—71
- [43] 周智彬, 李培军. 塔里木沙漠公路防护林土壤微生物活性研究. 中国沙漠, 2003, 23(4): 452—458. Zhou Z B, Li P J. Study on soil microorganism activities of shelter forest along Tarim Desert Highway (In Chinese). Journal of Desert Research, 2003, 23(4): 452—458
- [44] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 等. 极端干旱区防护林地土壤微生物多样性. 生态学报, 2009, 29(8): 4 548—4 559. Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, et al. Microbial diversities of shelter-forest soils in the extreme arid area (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4 548—4 559
- [45] 李兰, 周忠浩, 杜树汉, 等. 紫色土成土速率的估算与田间测定. 土壤学报, 2010, 47(3): 393—400. Li L, Zhou Z H, Du S H, et al. Model-based estimation and field measurement of purple soil formation rate. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 393—400
- [46] Bockheim J. Soil development rates in the Transantarctic Mountains. Geoderma, 2004, 47: 59—77
- [47] 李渝, 蒋太明, 魏朝富. 风化成土速率计算模型的研究进展. 土壤通报, 2010, 41(5): 1 252—1 256. Li Y, Jiang T M, Wei C F. Progress on calculation models of soil weathering rates. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5): 1 252—1 256
- [48] 严平, 董光荣, 邹学勇. 土壤风蚀容忍量(T值)研究的现状与问题. 水土保持通报, 1998, 18(1): 13—16. Yan P, Dong G R, Zou X Y. The present situation and problems of wind erosion tolerance(T-value) study. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1998, 18(1): 13—16

RESEARCH PROGRESS OF SOIL FORMING PROCESS OF AEOLIAN SANDY SOIL UNDER THE EFFECT OF ARTIFICIAL SHELTER-BELT

Li Congjuan¹ Lei Jiaqiang^{1†} Gao Pei² Xu Xinwen¹ Wang Yongdong¹ Fan Jinglong¹

(1 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Urumqi 830011, China*)

(2 *Xinjiang Information Engineering School, Urumqi 830013, China*)

Abstract Artificial shelterbelt is an important and effective measure for checking winds and fixing drifting sands and hence for controlling desertification. To build up windbreak forest belts in desert areas can effectively control soil erosion and promote accumulation of organic matter and clay in the soil and formation of crust at soil surface, thus fixing drifting sands and accelerating formation of aeolian sandy soil. Based on the theory of plant-soil interaction theory, an overview is presented of the effects of artificial shelterbelt on formation of aeolian sandy soil, from the aspects of the function of the aboveground parts of plants intercepting and accumulating nutrients and reducing surface soil evaporation, and the function of the underground parts of plants fixing drifting sands, decomposing organic matter and supplying nutrients. It was found from the researches in the past that during the soil forming process of aeolian sandy soil, the soil became finer in mechanical composition, lighter in bulk density, higher in soil porosity; more apparent in differentiation of soil profile structure, more in soil layer; more significant in nutrient enrichment, higher in population, species and activity of soil microbes, and higher in enzyme activity as well. In a word, with the establishment of artificial shelterbelt in desert, the aeolian sandy soil underneath altered significantly in soil properties, and developed gradually into fixed aeolian sandy soil, suggesting that windbreak forest belts and aeolian sandy soil develop synergically, which is beneficial not only to sustainable management of the forest belts, but also to control of desertification, and restoration and reestablishment of degraded ecosystems.

Key words Artificial shelter-belt; Aeolian sandy soil; Soil forming process