

# 丘间低地生态过程研究进展\*

张 乐<sup>1,2</sup> 刘志民<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 丘间低地是《国际保护日程》所列的重点保护生境,近 50 年来一直受到生态恢复和生物多样性保护专家的关注。本文从丘间低地植被过程、土壤发育过程、水文过程、尺度对丘间低地生态过程的影响,以及丘间低地生物多样性保护及生态恢复等方面概述了丘间低地生态过程的主要研究内容、趋势和进展。近十几年,丘间低地生态过程研究体现了从单尺度到多尺度或跨尺度、从表征描述到机制探讨、从野外调查到控制试验过渡的趋势。然而,丘间低地生态过程的尺度性仍有待进一步探讨,丘间低地景观格局对生态过程的影响尚不清楚。今后,半干旱内陆地区丘间低地生态过程的研究将趋于增多,干扰生态学和景观生态学的理论和方法将会在丘间低地研究中得到更多应用。

**关键词** 生态过程;尺度;生物多样性保护;丘间低地

中图分类号 Q948.15 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2007)07-1101-06

**Research progress in ecological processes in dune slacks.** ZHANG Le<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-min<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; <sup>2</sup>*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). *Chinese Journal of Ecology* 2007 26(7):1101-1106.

**Abstract:** As a key protected habitat type in the *International Conservation Agenda*, dune slack has received much attention in recent 50 years. From the aspects of vegetation processes, soil processes, hydrological processes, effects of scale on ecological processes, as well as biodiversity conservation and ecological restoration, this paper reviewed the main research contents and progress in ecological processes in dune slacks. In recent decades, the related researches are being undergone the shifts from single scale to multi-scale or cross-scale. To elucidate the mechanisms of different ecological processes, the transition from observational study to manipulation experiment has also become one of the characteristics. However, the effects of scale on ecological processes in dune slacks should be further approached, and the influences of dune slack landscape pattern on ecological processes should be better understood. For the future, the studies on the ecological processes in dune slacks in semi-arid region would be in progress, and the theories and methodologies of disturbance ecology and landscape ecology would be applied extensively.

**Key words:** ecological process; scale; biodiversity conservation; dune slack.

## 1 引 言

在内陆沙丘区和沿海、大湖岸,丘间低地位于沙丘之间的低洼地带,是由风蚀、风积作用形成的地貌单元。英国、荷兰、南非、法国、美国、比利时和新西兰等有大量海岸沙区丘间低地(Roxburgh *et al.*, 1994; Avis & Lubke, 1996; Bossuyt *et al.*, 2005),

半干旱内陆地区也有大量丘间低地。多数丘间低地植被发育良好、地下水位接近地表且波动频繁(Grotjans *et al.*, 1998),是破碎化生境中的“生命岛”(Bossuyt *et al.*, 2003),在逆转生境破碎化、抑制盐碱化和促进土壤发育等方面具有重要意义。

丘间低地生态过程研究始于 20 世纪 50 年代,近十几年逐渐从野外调查向控制试验、表征描述向机制探讨、单尺度向多尺度(或跨尺度)过渡。传统研究以野外调查为主,控制实验在近些年才被广泛引入(Vázquez *et al.*, 1998; Bakker *et al.*, 2005),以

\* 中国科学院沈阳应用生态研究所领域前沿资助项目(C12LD-06LYQY4001-506)。

\*\* 通讯作者 E-mail: zmliu@iae.ac.cn

收稿日期:2006-09-19 接受日期:2007-03-15

揭示各种生态过程的内在机制。生态过程的研究内容从单一的植被组成、演替序列、土壤理化性质、水文条件等的特征描述转到水文、植被、土壤、地貌之间相互作用的机制探讨( Grootjans *et al.* 1998)。近几年关于丘间低地格局对生态过程影响方面的研究越来越多,深入探讨了植物种对丘间低地的适应( Bossuyt *et al.* 2003 2005)。尽管单尺度丘间低地生态过程研究仍是主体,但多尺度或跨尺度研究正在呈逐渐增多的趋势( Bossuyt *et al.* 2004; Bossuyt & Hermy 2004b)。中国的一些学者也对丘间低地生态过程进行了初步论述(曹成有等 2000; 刘海江和郭柯 2003),但将丘间低地作为一个独立的景观单元探讨其对生态恢复和生物多样性保护影响方面的研究还很少。

本文概述了丘间低地植被过程、土壤发育过程、水文过程、尺度对丘间低地生态过程的影响,以及丘间低地生物多样性保护及生态恢复等方面的研究进展及趋势,为以后相关研究的展开提供参考。

## 2 丘间低地植被过程

### 2.1 演替序列

丘间低地植被演替过程可表现为不同生活型的植物相继侵入( Bossuyt *et al.* 2005)。南非海岸丘间低地植被的演替大致分成6个阶段:1)先锋植物阶段,以体型小、叶多汁、爬地生长的草本植物为主,偶见禾草鼠尾粟( *Sporobolus virginicus*)和小灌木 *Scaevola plumieri*,群落优势度大,多样性低,盖度小;2)丘间低地典型植被早期,草本植物仍占优势,但莎草科和禾草比例大幅增加,盖度和多样性均有一定提高,多样性增幅大于盖度增幅;3)丘间低地典型植被后期,灌木大量出现,草本植物比例降低,群落盖度大幅提高,多样性变化很小;4)灌丛阶段,灌木种类以 *Passerina rigida*、*Myrica cordifolia*、*Anthospermum littoreum* 为主,群落结构更加复杂,盖度,多样性和丰富度均增大;5)灌丛-乔木阶段,群落外貌与灌丛阶段相似,但组成更加复杂。出现乔木,灌木及草本植物比例降低,优势种为灌木 *Rhus crenata*、*Brachylaena discolor* 和乔木 *Sideroxylon inerme*;6)乔木阶段,为演替的顶极阶段。群落外貌和物种组成最复杂,盖度和丰富度最高,优势种为乔木 *Sideroxylon inerme* 和禾草 *Panicum aquinerve*( Avis & Lubke 1996)。

演替过程中植物生活型随纬度变化差异很小。

例如, Grootjans 等( 1996)将欧洲西海岸植被演替过程分成4个阶段,演替过程中植物群落的盖度、丰富度和植物生活型的变化与南非海岸基本一致。

演替过程中植物生活型随经度变化差异较大。在中国北方的科尔沁沙地,沙蓬( *Agriophyllum halodendron*)、小黄柳( *Salix gordejvii*)和芦苇( *Phragmites communis*)首先侵入,并迅速稳定,相继侵入的是虎尾草( *Chloris virgata*)、狗尾草( *Sataria viridis*)和密花拂子茅( *Calamagrostis epigeios*)。演替的顶级阶段以榆树( *Ulmus pumila*)和隐子草( *Cleistogenes squarrosa*)占优势(傅星和南寅镐 1992)。

### 2.2 演替机制

植被演替过程受温度、湿度、风况、盐碱化、动物采食、微生物、养分有效性和基质稳定性等多种因子影响,水位年际间变化和周期性沙埋对演替过程最具影响力,决定了其它因子的水平( Maun 1998)。

对缺氧条件适应能力的差异可能是造成植被带状分布的主要原因之一( Grootjans *et al.* 1998)。例如,水淹时间接近3个月时根茎禾草植物 *Cyperus articulatus*、过江藤( *Lippia nodiflora*)和 *Hydrocotyle bonariensis* 占优势,更长时间水淹则导致 *Pluchea odorata*、豚草( *Ambrosia artemisiifolia*)和坚尼草( *Panicum maximum*)等物种的侵入( Moreno-Casasola & Vázquez 1999)。

丘间低地植被与严酷的风沙过程相适应形成循环演替( Grootjans *et al.* 1998)。在科尔沁沙地,流动沙丘在冬春季西北向主风和夏季的西南向主风的共同吹蚀下,每年前移5~7 m,导致丘间低地内部不同发育年限的植被成带状分布,种类组成随发育年限而差异很大(曹成有等 2000)。

丘间低地面积和隔离程度对植被演替方向及速率具有显著影响( Bossuyt *et al.* 2003)。面积越小或隔离程度越大,群落之间的组成差异越小,演替速率和有机物质积累速率越低。由于植物繁殖体扩散能力差异,不同隔离程度将导致不同的演替方向。

### 2.3 生态适应

不同物种需要不同生境条件萌发、生长和维持。例如, *Schoenus nigricans* 的萌发和生长需要以裸质沙土为基础( Ernst & van der Ham 1988)增加有效磷将导致该物种的衰退( Sykora *et al.* 2004),但 Sival 和 Strijkstra-Kalk( 1999)认为是土壤酸化导致了 *S. nigricans* 衰退,而不是富营养化。土壤中金属离子的含量对濒危物种生存的影响具有选择性,如

$\text{Na}^+$  含量过高导致密花拂子茅 (*Calamagrostis epigejos*) 灭绝,但对锯叶棕櫚 (*Serenoa repens*) 却没有影响 (Sykora *et al.*, 2004)。黄柳 (*Salix gordejvii*)“生于丘间低地、长于半流动沙丘、死于固定沙丘”(曹新孙, 1984),是流动沙丘丘间低地的优势物种。黄柳之所以在丘间低地大量繁衍,与其独特的有性繁殖特性密切相关。黄柳种子在风季成熟,风季的干旱限制了众多其它植物的种子萌发,但并不能限制黄柳幼苗的大量产生。黄柳种子轻、具毛、易飞,属风力传播类型。丘间低地地表风蚀创造的湿润地表粘附了大量的黄柳种子,同时提供了种子发芽所必须的水分条件,因此,在雨季来临之前,大部分黄柳种子就能萌发、成苗。雨季来临后,黄柳幼苗则迅速生长,为逐渐形成黄柳群聚奠定基础 (Yan *et al.*, 2007)。

#### 2.4 土壤种子库

丘间低地种子库研究探讨了土壤种子库的寿命、组成变化、萌发条件及在植被恢复中的种源功能。

丘间低地养分贫乏、生境潮湿和干扰频繁而强烈发生导致其土壤种子库特征有别于其它生境的土壤种子库。随着丘间低地发育年龄的增加,土壤种子库表现出以下特征: 1) 种子平均寿命降低; 2) 种子密度和丰富度逐渐增大; 3) 体积较小、传播能力强的种子所占比例降低; 4) 物种丰富度与地上植被的相似性逐渐增强,但这种相似性随埋深的增加而降低; 5) 除少量先锋物种外,大部分物种不能形成持久种子库 (Bossuyt & Hermy, 2004a; Bakker *et al.*, 2005)。

丘间低地土壤种子在阴湿条件下萌发率较高 (Vázquez *et al.*, 1998)。 *Cyperus articulatus*、黑果飘拂草 (*Fimbristylis cymosa*)、*Fuirena simplex* 和星光草 (*Rhynchospora colorata*) 4 种丘间低地显花植物在湿

处理(确保沙土处于湿润状态)条件下的萌发率均高于干处理(1周浇水1次)。同时, Vázquez 等 (1998) 在探讨藻类对种子萌发的促进作用时发现,在相同浇水量条件下埋藏在有藻类覆被沙土内的种子萌发率最高,埋藏在裸露沙土内的种子萌发率最低,覆被棉花的沙土种子萌发率居于二者之间。

丘间低地植被恢复与当地土壤种子库的关系很复杂。Bakker 等 (2005) 在荷兰西海岸移去含有种子库的表土后,调查裸质沙土上发育的群落组成,发现在新稳定的群落中 76% 的物种在原土壤种子库中并未出现,土壤种子库中的物种出现在下一年植物群落的概率仅为 11%。

#### 3 丘间低地土壤发育过程

目前,关于丘间低地土壤发育过程的研究主要集中在生物个体、群落、区域 3 个尺度上。在生物个体尺度,植物的生理生态特征对土壤发育过程影响显著 (Sykora *et al.*, 2004)。研究认为植物可以形成较大生物量积累的生理生态特征主要有: 1) 较强的内部养分循环能力; 2) 根的散氧 (radial oxygen loss) 特征 (Grootjans *et al.*, 1998)。丘间低地早期先锋物种通常表现出较明显的散氧特征。Adema 和 Grootjans (2003) 用 *Littorella uniflora* 和 *Carex nigra* 分别代表具有和不具有散氧特征的物种,探究散氧特征对土壤理化性质的影响,结果表明 2 种植物周围土壤性状差异很大,尤其是 *Littorella uniflora* 周围土壤溶液中的硝态氮含量明显高于 *Carex nigra* 周围。

在群落尺度,较多的研究关注植被演替对土壤发育的影响 (Adema & Grootjans, 2003; Sykora *et al.*, 2004)。随着演替的进展,有机物质积累增多、土壤酸化作用增强。土壤 pH 在裸沙阶段出现最大值,随后一直呈下降趋势 (Sykora *et al.*, 2004)。但演

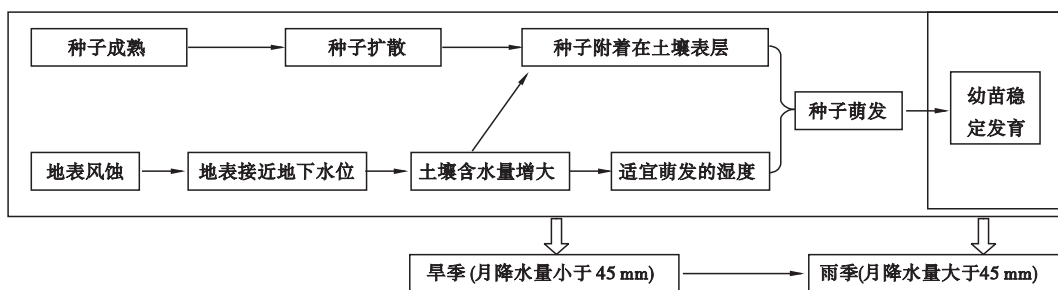


图 1 黄柳在风蚀丘间低地发育的示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the processes involved in the establishment of *S. gordejvii* in dune slacks by seed propagation

替阶段中有机质层的增厚可否等同为土壤肥力的增加仍有待进一步探讨,因为演替过程中全 N、全 P、有效 P 含量明显增加,而  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  含量变化却很小( Sykora *et al.* 2004)。植被生物量与土壤肥力呈正比,丘间低地植被生物量仅在初始演替的 10 年内呈增加趋势,随后变化不大,反映了土壤肥力的变化趋势( Sykora *et al.* 2004)。

在区域尺度的研究关注气候对土壤发育过程的影响( Sevink, 1991)。温度与土壤有机物质积累呈反比,温度越低,有机物质积累越多,直至形成泥炭层。随着干燥度的增大,丘间低地发生盐碱化的几率增大。在欧洲,盐碱化的丘间低地主要分布于南部气候干燥的地中海气候区,而湿润的温带海洋性气候区则较少。

#### 4 丘间低地水文过程

丘间低地地下水位波动、水文条件、水化学特征和缓冲机制是丘间低地水文过程研究的主要内容。丘间低地水文条件受诸如地貌状况、植被类型及全球变化等多种因素影响( Bakker, 1990; Lammerts *et al.* 2001)。较高的沙脊和狭小的沙谷地貌提升了地下水位( Grootjans *et al.* 1998),裸露沙土蓄水能力差,易形成地表径流( Lammerts *et al.* 2001)。蒸腾作用强的物种如滨草( *Ammophila arenaria*) 可明显降低地下水位( 阿拉木萨等 2004)。丘间低地水化学特征和地上植被密切相关( Grootjans *et al.* 1996; Sival & Grootjans, 1996; Sival & Strijkstra-Kalk, 1999),例如,植物根的呼吸作用和微生物活动可显著影响地下水含钙量( Lammerts *et al.* 2001)。全球变暖导致的海平面上升可提高丘间低地地下水位( Noest, 1991)。

#### 5 丘间低地生态过程的尺度性

尺度概念在近几年开始渗入丘间低地生态过程研究,生物个体尺度、单个丘间低地尺度、丘间低地类型尺度与物种适应和分布格局的关系受到了关注(图 2)。在生物个体尺度,植物生理生态特征与丘间低地腐殖质分解速率、养分含量、养分有效性密切相关,在丘间低地尺度,植被演替和土壤发育受风沙活动和地下水位波动控制,生物多样性受丘间低地面积和形状制约,将丘间低地看作斑块,则在斑块类型尺度,丘间低地之间的距离和周围沙丘的高度对物种扩散存在影响,不同类型丘间低地组合具有不同的物种交流机制( Grootjans *et al.* 1998)。在比利时和法国北部, Bossuyt 等( 2004b) 在丘间低地(  $0.008 \sim 0.06 \text{ km}^2$ )、亚区域(  $2 \text{ km}^2$ )、区域(  $45 \text{ km}^2$ ) 3 个尺度上分析物种分布格局,结果表明,物种扩散能力和生态位限制是稀有物种分布范围狭小的主要原因,而隔离效应和空间异质性主要体现在小尺度上。Bossuyt 和 Hermy( 2004b) 在  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 、 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$  这 4 个尺度上的研究表明,  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  尺度上物种数量的对数转换值与面积的对数转换值线性相关,回归斜率为 0.23。另外,影响演替过程中群落集群的因子具有尺度性,例如,物种数量的限制发生在  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  尺度上, Bossuyt 等( 2005) 通过零模型分析排除了生境异质性和物种扩散能力的影响,而共位群比例分析最终证实是共位群物种间的竞争排斥对物种数量起决定作用。尺度越小,种群周转率越高,物种分布格局的自相似断裂发生在最小尺度上( Bossuyt *et al.* 2005)。

#### 6 丘间低地生物多样性保护和生态恢复

丘间低地生态过程与生物多样性保护和生态恢

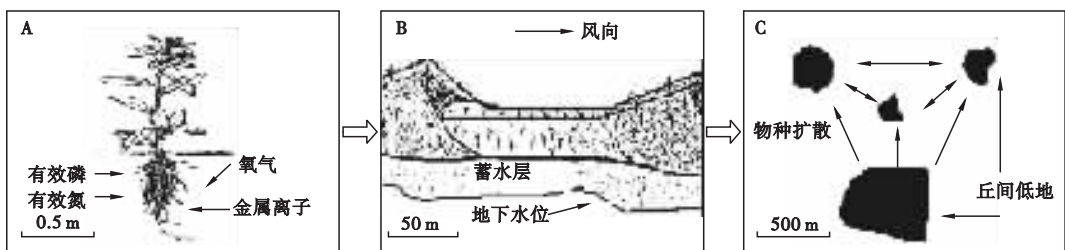


图 2 丘间低地在生物个体尺度( A)、丘间低地尺度( B)和丘间低地类型尺度( C)上的生物与环境相互作用关系示意图  
Fig. 2 Schematic diagram showing the relationship between plant species and environment under the scale of individual plant ( A), dune slacks ( B) and aggregate dune slacks ( C)

复的关系研究已有很多报道(蒋德明等,2004)。Ernst等(1996)发现,耐碱先锋群落的维持需要在pH>6的贫养条件下才能实现,自然发育仅能维持35年,但割草、放牧等干扰措施能使群落维持100年以上(Lammerts & Grootjans,1998)。荷兰早在1952年就开始采用放牧、割草、移去草皮甚至重建人工丘间低地等措施来抑制西海岸耐碱先锋群落的衰退。重建丘间低地恢复濒危物种的效果不如移去草皮的效果理想(Grootjans *et al.*, 2002)。

## 7 丘间低地生态过程研究面临的挑战和展望

### 7.1 丘间低地生态过程研究面临的挑战

近些年丘间低地生态过程研究取得了很重要进展,但这一领域的研究还面临诸多挑战:

1)生态过程的尺度性还有待深入探讨。植物生理生态特征、风沙过程、景观隔离效应和气象因子分别在不同尺度上控制演替过程和水文条件,这些因子在不同尺度上的权重有待进一步探讨,作用的特征尺度需进一步量化。

2)虽然现有研究涉及了众多地理区域,但总体看海岸沙丘区的丘间低地生态过程研究占绝大部分,半干旱内陆地区丘间低地的研究还较少,而全球荒漠化态势的不断恶化迫切需要加强内陆破碎化生境的生物多样性保护和生态恢复研究。

3)丘间低地景观格局对生态过程的影响还没有引起重视,不同类型丘间低地组合的生态过程不同,流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘对相邻丘间低地的边缘效应还不清楚,沙丘高度和形状对丘间低地物种扩散的隔离效应研究有待加强。

4)生境破碎化在大多数场合被认为将导致植物多样性丧失,但也有研究表明部分丘间低地物种仅能在破碎化生境中维持,如何平衡生境修复与植物多样性保护间的关系是丘间低地生态过程研究中亟待解决的问题。

### 7.2 丘间低地生态过程研究展望

在未来一段时间,丘间低地生态过程研究将表现这样几个趋势:1)从研究范畴上看,随着全球荒漠化态势的进一步恶化,半干旱内陆地区丘间低地生态过程研究将趋于增多,对生物多样性保护的理理解将不断加深,新的保护措施将不断涌现;2)从研究范式上看,干扰生态学和景观生态学的理论和方法将更多的融入丘间低地生态过程研究。可持续发展理念将对今后的研究工作起到更明显指导作用;

3)从研究手段上看,将遥感、地理信息系统和长期定位监测将更多地应用于丘间低地生物多样性保护和植被管理研究。

致谢 感谢阿拉木萨博士的宝贵建议,感谢刘兴宇、郭颖在绘图方面提供的热心帮助。

### 参考文献

- 阿拉木萨,蒋德明,裴铁潘. 2004. 科尔沁沙地人工小叶锦鸡儿植被水分入渗动态研究. *生态学杂志*, **23**(1): 56-59.
- 曹成有,寇振武,蒋德明,等. 2000. 科尔沁沙地丘间地被演变的研究. *植物生态学报*, **24**(3): 262-267.
- 曹新孙. 1984. 内蒙古东部地区风沙干旱综合治理研究. 呼和浩特:内蒙古人民出版社:179-180.
- 傅星,南寅镐. 1992. 科尔沁沙地盐生草甸主要植物群落种群格局的研究. *应用生态学报*, **3**(4): 313-320.
- 蒋德明,刘志民,寇振武,等. 2004. 科尔沁沙地生态环境及其可持续管理——科尔沁沙地生态考察报告. *生态学杂志*, **23**(5): 179-185.
- 刘海江,郭柯. 2003. 浑善达克沙地丘间低地植物群落的分类与排序. *生态学报*, **23**(10): 2163-2169.
- Adema EB, Grootjans AP. 2003. Possible positive-feedback mechanisms: Plants change abiotic soil parameters in wet calcareous dune slacks. *Plant Ecology*, **167**: 141-149.
- Avis AM, Lubke RA. 1996. Dynamics and succession of coastal dune vegetation in the Eastern Cape, South Africa. *Land-scape and Urban Planning*, **34**: 237-254.
- Bakker C, De Graaf HF, Ernst WHO, *et al.* 2005. Does the seed bank contribute to the restoration of species-rich vegetation in wet dune slacks? *Applied Vegetation Science*, **8**: 39-48.
- Bakker TWM. 1990. The geo-hydrology of coastal dunes, *Catena*, **18**: 109-119.
- Bossuyt B, Hermy M. 2004a. Seed bank assembly follows vegetation succession in dune slacks. *Journal of Vegetation Science*, **15**: 449-456.
- Bossuyt B, Hermy M. 2004b. Species turnover at small scales in dune slack plant communities. *Basic and Applied Ecology*, **5**: 321-329.
- Bossuyt B, Honnay O, Hermy M. 2003. An island biogeographical view of the successional pathway in wet dune slacks. *Journal of Vegetation Science*, **14**: 781-788.
- Bossuyt B, Honnay O, Hermy M. 2004. Scale-dependent frequency distributions of plant species in dune slacks: Dispersal and niche limitation. *Journal of Vegetation Science*, **15**: 323-330.
- Bossuyt B, Honnay O, Hermy M. 2005. Evidence for communi-

- ty assembly constraints during succession in dune slack plant community. *Plant Ecology*, **178**:201–209.
- Ernst WHO, Slings QL, Nelissen HJM. 1996. Pedogenesis in coastal wet dune slacks after sod-cutting in relation to revegetation. *Plant and Soil*, **180**:219–230.
- Ernst WHO, van der Ham NF. 1988. Population structure and rejuvenation potential of *Schoenus nigricans* in coastal wet dune slacks. *Acta Botanica Neerlandica*, **37**:451–465.
- Grootjans AP, Ernst WHO, Stuyfzand PJ. 1998. European dune slacks: strong interactions of biology, pedogenesis and hydrology. *Trends in Ecology and Evolution*, **13**:96–100.
- Grootjans AP, Geelen HWT, Jansen AJM, et al. 2002. Restoration of coastal dune slacks in the Netherlands. *Hydrobiologia*, **478**:181–203.
- Grootjans AP, Sival FP, Stuyfzand PJ. 1996. Hydro-geochemical analysis of a degraded dune slack. *Plant Ecology*, **126**:27–38.
- Lammerts EJ, Grootjans AP. 1998. Key environmental variables determining the occurrence and life span of basiphilous dune slack vegetation. *Acta Botanica Neerlandica*, **47**:369–392.
- Lammerts EJ, Maas C, Grootjans AP. 2001. Groundwater variables and vegetation in dune slacks. *Ecological Engineering*, **17**:33–47.
- Maun MA. 1998. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, **76**:713–738.
- Moreno-Casasola P, Vázquez G. 1999. The relationship between vegetation dynamics and water table in tropical dune slacks. *Journal of Vegetation Science*, **10**:515–524.
- Noest V. 1991. Simulated impact of sea level rise on phreatic level and vegetation in dune slacks in the Vooorne dune area. *Landscape Ecology*, **6**:89–97.
- Roxburgh SH, Wilson JB, Gitay H, et al. 1994. Dune slack vegetation in southern New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology*, **18**:51–64.
- Sevink J. 1991. Soil development in the coastal dunes and its relation to climate. *Landscape Ecology*, **6**:49–56.
- Sival FP, Grootjans AP. 1996. Dynamics of seasonal bicarbonate supply in a dune slack: Effects on organic matter, nitrogen pool and vegetation succession. *Plant Ecology*, **126**:39–50.
- Sival FP, Strijkstra-Kalk M. 1999. Atmospheric deposition of acidifying and eutrophating substances in dune slacks. *Water, Air, and Soil Pollution*, **116**:461–477.
- Sykora KV, van den Bogert JCJM, Berendse F. 2004. Change in soil and vegetation during dune slack succession. *Journal of Vegetation Science*, **15**:209–218.
- Vázquez G, Moreno-Casasola P, Barrera O. 1998. Interaction between algae and seed germination in tropical dune slack species: A facilitation process. *Aquatic Botany*, **60**:409–416.
- Yan QL, Liu ZM, Ma JL, et al. 2007. The role of reproductive phenology, seedling emergence and establishment of perennial *Salix gordejvii* in active sand dune fields. *Annals of Botany*, **99**:19–28.

---

作者简介 张乐,男,1982年生,硕士研究生。主要从事荒漠化机制研究。E-mail:zhangle9527@sohu.com  
责任编辑 刘丽娟

---