

沙地土壤磷循环研究*

周全来^{1,2} 蒋德明^{1,*}

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016 ;² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 磷素是干旱半干旱地区沙地生态系统的限制性养分因子, 沙地土壤磷循环对沙地生态系统生产力维持至关重要, 越来越受到人们的关注。本文根据国内外研究成果, 对沙地土壤磷的来源、磷库容量、磷循环途径和影响磷循环的因素等关键问题进行综述, 认为磷循环研究方向可归纳为以下几个方面: 1) 影响沙地土壤磷循环各因素的作用机制; 2) 不同磷循环途径的磷收支通量; 3) 不同土壤利用状态下, 磷平衡状况; 4) 不同土壤利用状态下, 土壤生产力的可持续性; 5) 维持土壤磷平衡采用的生态恢复手段。上述研究, 对于维持沙地生态系统稳定的生产力, 解决人与资源和环境的矛盾均有指导作用。

关键词 沙土; 土壤磷库; 土壤磷平衡; 土壤磷收支

中图分类号 Q142.3 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)10-2117-06

Soil phosphorus cycling on sandy lands: A review. ZHOU Quan-lai^{1,2}, JIANG De-ming¹
(¹ *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*;
² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(10) 2117-2122.

Abstract: Phosphorus (P) is one of limiting nutrient elements in sandy land ecosystems of arid and semi-arid areas, and the soil P cycling on sandy lands is of great significance in maintaining ecosystem productivity of sandy land, being paid more and more attention by the people. In this paper, the latest research advances at home and abroad on the sandy land soil P sources, P pools, and P cycling pathways, and the factors affecting the P cycling were summarized, with the following further research aspects suggested: 1) the action mechanisms of the factors affecting the P cycling, 2) the P budget fluxes in different P cycling pathways, and 3) the status of soil P balance and the sustainability of soil productivity under different land use. The above research aspects would give references to the maintenance of sandy land ecosystem productivity and the mitigation of the contradictions between human beings and natural resources and environment.

Key words: sandy soil; soil phosphorus pool; soil phosphorus balance; soil phosphorus budget.

磷是植物所需主要营养元素之一, 对植物生长和繁殖起关键作用, 磷元素循环主要依赖地质运动、矿物风化、水流输运、磷矿开采和海产品的捕捞等过程。磷循环中几乎不存在气体状态, 因此, 土壤中磷素循环缓慢, 是地质时代尺度上生物生产力的限制性养分元素, 已逐渐成为陆地生态系统植物养分的限制因子之一(沈善敏, 2000; Compton *et al.*, 2000)。由于磷在沙地土壤中含量少, 多以不易为植物利用的固定态存在(周涛等, 2000), 且参与生

物循环的磷仅是土壤全磷的很小部分, 因此, 磷素被认为是干旱区生态系统的限制性养分因子(Lajtha & Schlesinger, 1988)。但是, 长期以来, 人们对干旱半干旱生态系统土壤养分的研究多以不同时、空尺度下的养分空间分布为主(Schlesinger *et al.*, 1990, 1996; 赵学勇和贺丽萍, 2002; 陈伏生等, 2004; 许文强等, 2006), 而且以土壤有机质、碳和氮的研究居多, 而磷循环过程的研究一直被忽视(Zaady *et al.*, 1996)。并且, 在大多数自然陆地生态系统中, 磷素的输入和输出量都很低, 输出量大于输入(Newman, 1995)。因此, 磷在土壤中的库存量和迁移量会直接影响某些植物生态过程(Feller *et al.*, 2003), 或对系统其他组分的生态过程的限制使磷成为整个系统

* 国家自然科学基金项目(30800163)和国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD2680401)。

** 通讯作者 E-mail: jiangdeming@iae.ac.cn

收稿日期: 2009-02-19 接受日期: 2009-06-22

的限制因子(Cleveland *et al.* 2002 ;Sundareshwar *et al.* 2003)。因此,沙地土壤磷循环研究对沙地植被恢复和磷素利用的可持续性有重要意义。

1 沙地土壤磷来源

沙地土壤磷来源主要有2种途径:土壤母质和大气干湿沉降。陆地生态系统的磷最初都来源于矿物岩石(主要是磷灰石和其他含磷化合物)的缓慢风化作用(沈善敏 2000)。在没有外来肥料施入的情况下,土壤磷含量主要决定于母质类型。沙地土壤中磷矿化合物含量低,导致沙地土壤磷含量远低于其他土壤。尽管磷的生物地球化学循环属于沉积型循环,但进入大气中的土壤细颗粒和植物体碎屑等,以干湿沉降的方式落于地表,成为土壤磷输入一部分。在干旱半干旱地区,风沙大,干湿沉降磷输入量不可忽视(Li *et al.* 2004)。沙地农田土壤磷的来源,除来自土壤母质和大气干湿沉降外,主要来自化学肥料及牲畜粪肥,满足农作物对大量营养元素的需求(王桂荣和张春兴,1996)。

2 沙地土壤磷库

2.1 土壤磷库的划分

土壤磷库的总贮量称为土壤全磷含量,也称为土壤总磷库。对土壤磷库的研究有两种主要方法:一种是把土壤磷库分为无机磷和有机磷库。无机磷库按形态分为磷酸钙盐、磷酸铝盐、磷酸铁盐和闭蓄态的磷酸盐(蒋柏藩和沈仁芳,1990)。土壤中有机磷库研究起步较晚,进展缓慢,已知的有机磷化合物中包括植素类、核酸类和磷酸酯类。由于有机磷的结构复杂,约有1/2左右有机磷化合物的性质和结构不为人知。不同土壤有机磷占总磷比例变化范围很宽,有机磷含量差异较大(赵琼等,2004)。通过有机磷的矿化作用 and 无机磷的生物固持作用,土壤有机磷库和无机磷库在一定条件下会相互转化。

由于土壤磷成分复杂,依据土壤磷对植物的有效性,Larsen(1967)将土壤磷库分为三部分:土壤溶液中的溶解态磷(dissolved P)、活性磷(labile P)和非活性磷(non-labile P)。这3部分均包括有机态磷和无机态磷,三者之间并无明确界限,彼此处于动态平衡之中,难以精确测定。溶解态磷包括各种价态磷酸根离子和溶解态有机磷,可以直接被植物吸收,在土壤溶液中含量极微(McDowell & Sharpley, 2001)。土壤活性磷对作物有效性高,通常可以用

同位素交换法的测定结果表征,因而也称为同位素交换磷(沈善敏 2000)。土壤非活性磷是指不能被当季植物利用的磷。土壤中三种状态的磷通过吸附与解吸、溶解与固定和矿化与固持等过程相互转换。因此,土壤中并不存在“无效态”磷,所谓的“有效磷”与“无效磷”多是指对植物的相对有效性而言,土壤中非活性磷用缓效磷表达更为恰当。

2.2 沙地土壤磷库

沙地土壤磷库磷含量因土壤母质、气候、人类活动等因素呈现显著差异。由于沙地土壤母质全磷含量低,质地粗,保水保肥能力差,不适于植物生长,是导致沙地土壤磷库磷含量低的主要原因。

气候条件会影响沙地荒漠化过程。风力状况、年平均温度和年降水量与土地荒漠化的关系最为密切。年平均温度高,蒸发量大,降水量少,地表植被盖度低等,都为地表土壤风蚀创造条件。土地荒漠化演变过程中,富含营养的地表细颗粒风蚀损失,土壤磷含量降低,变异程度增加(苏永中,2004;王涛等,2004a)。

人类活动包括放牧、开垦、樵采和封育等因素,樵采、放牧和开垦强度增加使地表植被覆盖度降低,破坏植被与土壤养分循环,土壤表层结构破坏,降低土壤表层磷含量,而封育会使土壤表层磷含量显著增加(苏永中等,2002a,2002b)。

不同类型沙地表层土壤磷含量差异较大。流动沙丘表层土壤全磷含量 $0.02 \sim 0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $0.5 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (赵琼等,2004;曹成有,2004;Chen *et al.* 2004;姚丽和刘廷玺,2005);在流动沙丘上经人工植被恢复15年以上的土壤或地表风蚀严重退化的土壤,表层土壤全磷含量为 $0.10 \sim 0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层速效磷含量 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (苏永中等,2002c;赵哈林等,2002;曹成有等,2004b;Chen *et al.* 2004;张华等,2005;姚丽和刘廷玺,2005);退化沙质草地土壤表层全磷含量为 $0.12 \sim 0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层速效磷含量 $4.1 \sim 8.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (苏永中等,2002a);受人类活动干扰较少的沙质草地和灌丛土壤,表层土壤全磷含量为 $0.15 \sim 0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层速效磷(Olsen-P)含量 $5 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (苏永中等,2002b;李香真等,2002;姚丽和刘廷玺,2005);开垦2年后的农田土壤表层全磷含量为 $0.07 \sim 0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层速效磷含量 $2.4 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,围封后5年草地土壤表层全磷含量为 $0.14 \sim 0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层速效磷含量 $7.4 \sim 11.1 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1} (苏永中等 2002a)。

同一类型土壤垂直方向和水平方向都存在显著差异。由于灌木和半灌木对土壤表面养分的富集作用,即“肥岛”效应,同一类土壤表现为水平方向斑块差异(苏永中等 2002c;许文强等 2006;张强等, 2006)。由于地表降尘、植物根吸收、凋落物分解等过程,沙质草地土壤养分逐渐向地表聚集,在垂直方向也存在显著差异,尤其表层 0~10 cm 内土壤磷浓度随深度增加差异尤其明显,10 cm 以下土壤差异减小,30 cm 以下趋于稳定,接近流动沙丘土壤磷水平(苏永中等,2002b;曹成有等,2004;赵琼等, 2004)。而农田土壤与未开垦土壤存在差异,如果农田土壤施肥,农田土壤全磷与速效磷增加(陈伏生和曾德慧,2005),表层土壤磷空间异质性增强(陈伏生等 2005),如果不施肥,不但表层土壤磷含量会降低,甚至会低于下层土壤,如开垦 2 年后的农田土壤表层全磷含量为 $0.07 \sim 0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,下层全磷含量为 $0.10 \sim 0.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (苏永中等, 2002a)。

不同土壤有机磷占全磷百分比变幅很宽,樟子松人工林土壤有机磷占全磷比率为 40%~80%,表层高达 80%(赵琼等 2004),而风沙土有机磷占全磷含量的 8%(周涛等 2000)。由于沙地土壤磷含量低,除全磷和速效磷以外,对其他形态磷研究较少。

3 沙地土壤磷循环途径

3.1 沙地土壤磷的输入

从沙地生态系统看,土壤磷输入的途径有矿物的风化、大气干湿沉降、风积和植物凋落物分解等。矿物风化过程缓慢,估计以 $0.05 \sim 1.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 速度进入土壤,但却是生态系统磷的最初来源(沈善敏 2000)。干旱半干旱地区冬、春季风沙大,浮尘、扬沙和沙尘暴天气经常出现,地表降尘量较大。1999 年新疆和田降年尘量可达 $11700 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (关欣等 2000)。在内蒙古锡林格勒草原,放牧与未被放牧的草地降尘量分别为每天 1300 和 $2400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Hoffmann *et al.* 2008)。科尔沁沙地农业区降尘量平均每天 $19.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷增加量每天可达 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ (Li *et al.* 2004)。可见,干旱半干旱地区大气降尘是土壤磷的重要来源之一,利于土壤长期维持生产力(Okin *et al.* 2004)。

灌丛的积沙作用对磷有明显的富集作用(Wezel *et al.* 2000;李香真等 2002;张华等 2005);土壤表面凋落物中的磷随腐解过程将磷释放到土壤中(郭艳娜等 2004;郭剑芬等 2006)。但沙地气候干旱,凋落物分解缓慢,因此,地表凋落物含有的磷释放到土壤中相对较少。

沙地农田土壤磷输入途径除降尘等自然因素,还包括施入化肥、有机肥和秋季留茬等措施(陈伏生和曾德慧 2005)。化肥在农田施肥中所占比重增加,施入量在 $70 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (张雄等 2006)。但也存在掠夺性农业生产现象,不施加肥料,使地力在短期内耗尽,然后撂荒,为沙漠化的发展创造了条件(赵哈林等 1998)。

3.2 沙地土壤磷的输出

沙地生态系统磷输出的途径有地表径流、淋溶作用、水土流失和风蚀。磷素的地表径流迁移是一个十分复杂的过程,它受降雨过程(降雨类型、降雨强度及降雨历时)、下垫面因素(土壤类型、土壤理化性质等)、地表植被和地质水文条件等的综合影响,而且磷素的地表径流损失大多由于雨水的直接冲刷引起的(梁新强等 2005)。但是,沙地年降雨量少,地形平坦处一般不形成径流,只有处于低地的河流和湖泊等处,磷随地表径流损失会较多。干旱区沙地土壤的生物、物理、化学性质决定了土壤对磷素的固定和缓冲能力差(Leinweber *et al.* 1999;章明奎 2004),土壤中的磷也会随地表径流离开系统或随淋溶作用进入深层土壤,从而不能为植物利用(Turner & Hayarth 2000;王小龙,2001)。相比之下,在陡峭的河岸和坡地,由于人为干扰和气候条件变化,地表植被遭到破坏,当雨季到来时,会发生较大的水土流失,土壤磷损失严重。土壤风蚀导致有机质被吹失,土壤结构破坏,土壤肥力下降,土质粗化,保水、保肥能力降低(Kennedy & Papndik 1995;苏永中等 2004;Zhao *et al.* 2006),可引起大量磷损失(赵文智 1994);有资料表明,表土风蚀量可达 $4.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,风蚀损失磷量每天可达 $0.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Li *et al.* 2004)。

农田土壤磷输出包括:1)作物种子和秸秆中含有的磷随收获物离开土壤,是农田土壤磷的主要输出途径;2)风蚀作用使表层土壤磷损失,研究表明,风蚀引起土壤全磷含量下降 59.4%,速效磷含量下降了 27.5%(赵哈林等 2002);3)集中施入土壤的磷在雨季发生径流和淋溶损失(王小龙 2001)等。

3.3 植物-土壤反馈对磷循环的影响

植物-土壤正反馈定义为由植物自身引起的,利于其定居、生长和繁殖的有利的土壤条件,植物-土壤负反馈定义为由植物自身引起的,对其定居、生长和繁殖的不利的土壤条件(Bonanomi *et al.* 2008)。在流动沙丘上建立人工植被或对退化草场围封后,随植被盖度的增大,风沙活动减弱,尘降增加,植物凋落物增加,在物理、化学与生物作用下,地表0~10 cm土壤磷含量增加明显,从而为更多植物定居、生长和繁殖创造条件(曹成有等 2004),呈现植物-土壤正反馈。稳定的灌木群落中存在土壤资源的聚集(“肥岛”)现象,利于其他草本植物入侵,而其本身会由于潜在的自毒作用而变稀疏,出现植物-土壤正、负反馈共存现象(Bonanomi *et al.* 2008),表明植物-土壤反馈效应随环境条件而改变,当去除外界干扰后,表现为植物生长环境趋于稳定,促进土壤磷生物循环。

由于气候变暖、严重放牧和野生动物取食等综合因素影响,干旱、半干旱地区的许多草地生态系统逐渐被灌木生态系统所取代(van Auken 2000),由于灌木下形成“肥岛”,加速灌木取代草地进程,从而导致了灌木分布面积逐步扩大,出现灌木与土壤之间的正反馈效应,地表养分异质性增加(Schlesinger *et al.* 1990, 1996)。磷在地表的聚集现象明显,土壤磷主要聚集在距灌丛中心0~30 cm,超过30 cm磷浓度逐渐降低(许文强等 2006; Bonanomi *et al.* 2008)。随灌木入侵草地生态系统时间延长,地表养分异质性程度加深,地表植被也出现斑块状分布,加之放牧牲畜啃食和践踏,灌丛内植物生长良好,灌丛间植物生长势变弱,导致灌丛间土壤易受风蚀,加速了土地荒漠化过程(Schlesinger *et al.* 1996)。可见,人类的强烈干扰破坏了植物-土壤正反馈,导致土壤磷因风蚀损失。

4 沙地土壤磷循环的影响因素

4.1 自然因素

影响沙地土壤磷循环的自然因素主要包括气候和土壤等。我国沙地均为干旱半干旱气候带,主要表现为干旱少雨,温度变化明显,湿度低,风大沙多等(蒋德明等 2005)。由于降水量少,地表植被稀疏,地上生物量低,地表凋落物量少,限制磷的循环数量,温湿度低,凋落物分解慢,限制磷的循环速度。沙地土壤母质以第四纪松散碎屑物质沉积为主,缺

少胶结物质,质地疏松,内聚力差,极易被风力所吹扬,引起地表土壤风蚀(李洪文等 2006; 刘建凯等, 2007),使聚集于地表的富磷土壤损失,磷循环途径由封闭变得更开放,从而打破土壤磷平衡。沙土对磷的吸附能力弱,因此,沙土有效磷的释放不是由土壤吸附-解吸过程控制,而是由沉淀-溶解过程控制,所以,除土壤非活性磷以外,其他形态磷均可全部或部分释放到土壤中(Zhang *et al.* 2002),使土壤磷易于通过地表径流和淋溶等过程从生态系统输出,加剧土壤磷损失,使沙地土壤贫磷现象更严重。因此,沙地土壤生态系统一旦遭到破坏,不易在短时间内恢复。

4.2 人为因素

人类活动对沙地土壤磷循环起正反两方面的作用。在我国北方生态脆弱带,急剧增加的人口压力和经济活动范围的扩大强烈干扰自然环境,对土地资源的不合理利用可短期内造成大面积的生态环境恶化和沙漠化,主要表现在大面积开垦土地、滥砍滥伐、过度放牧等(朱震达, 1991),受经济利益趋动的人为过程在沙漠化发展中是一个恶性循环过程,地表植被破坏导致地表粗糙度降低,从而加剧风沙流活动(王涛和朱震达, 2001),当对土地的开发强度超越了原本脆弱的生态系统所能承受的压力时,必然造成其生态系统的进一步恶化,如植被退化,水土流失,表土风蚀等,封闭的土壤磷循环过程被破坏,土壤磷平衡丧失。

沙漠化发展和逆转是人类活动与自然环境相互影响和协调的结果(王涛等 2004b)。由于生态系统存在自我修补调节作用,如果人为扰动因素消除或降低,植被得以逐步恢复,甚至恢复地表的原始景观(王涛和朱震达, 2001)。而进行合理的生态恢复和重建,如实行封沙育草,控制牲畜数量,建立农田防护林体系,退耕还牧等措施,加强生态恢复建设,会加快生态系统恢复过程(苏世平等 2006),减少土壤风蚀,改善区域生态环境,使沙地地表土壤得到固定,植被盖度和种类增加,土壤磷逐渐聚集,磷循环向平衡方向发展。

5 展望

沙地生态系统结构简单,对外界干扰反应敏感,封闭的磷循环途径易受外界干扰而中断,环境受破坏后恢复力弱,易导致土地荒漠化。沙地土壤磷含量低,地形地貌复杂,为土壤磷循环研究增加困难。

我国在沙地土壤磷循环研究较少,今后研究方向可归纳为以下几个方面:1)影响沙地土壤磷循环各因素的作用机制;2)不同磷循环途径的磷收支通量;3)不同土壤利用状态下,磷平衡状况;4)不同土壤利用状态下,土壤生产力的可持续性;5)维持土壤磷平衡采用的生态恢复手段。通过以上研究,对于维持沙地生态系统持续、稳定的生产力,解决人与资源、环境矛盾均有指导作用。

参考文献

- 曹成有,蒋德明,全贵静,等. 2004b. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化. 水土保持学报, 18(6): 108-111, 131.
- 陈伏生,曾德慧,陈广生. 2004. 土地利用变化对沙地土壤全氮空间分布格局的影响. 应用生态学报, 15(6): 953-957.
- 陈伏生,曾德慧. 2005. 耕种对沙地土壤全磷空间变异性的影响. 中国环境科学, 25(增刊): 85-88.
- 关欣,李巧云,文倩,等. 2000. 和田降尘与浮尘、扬沙、沙尘暴关系的研究. 环境科学研究, 13(6): 1-3, 7.
- 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,等. 2006. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, 42(4): 93-100.
- 郭艳娜,霍沁建,袁玲. 2004. 森林土壤肥力概述. 中国农学通报, 20(3): 143-148.
- 蒋柏藩,沈仁芳. 1990. 土壤无机磷分级的研究. 土壤学进展, 18(1): 1-8.
- 蒋德明,王红梅,李雪华,等. 2005. 科尔沁沙地乌兰敖都地区气温变化趋势分析. 干旱区研究, 22(3): 322-325.
- 李洪文,杜绍敏,阴秀琪. 2006. 内蒙古自治区东部荒漠化成因分析. 自然灾害学报, 15(2): 95-98.
- 李香真,张淑敏,邢雪荣. 2002. 小叶锦鸡儿灌丛引起的植物生物量和土壤化学元素含量的空间变异. 草业学报, 11(1): 24-30.
- 梁新强,田光明,李华,等. 2005. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究. 水土保持学报, 19(1): 59-63.
- 刘建凯,富远年,宋良红. 2007. 民勤县荒漠化成因与防治对策. 水土保持通报, 27(3): 180-182.
- 沈善敏. 2000. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社.
- 苏世平,张继平,付广军,等. 2006. 榆林沙区荒漠化成因及防治对策. 西北林学院学报, 21(2): 16-19.
- 苏永中,赵哈林,崔建垣. 2004. 农田沙漠化演变中土壤性状特征及其空间变异性分析. 土壤学报, 41(2): 210-217.
- 苏永中,赵哈林,文海燕. 2002a. 退化沙质草地开垦和封育对土壤理化性状的影响. 水土保持学报, 16(4): 5-8, 126.
- 苏永中,赵哈林,张铜会,等. 2002b. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征. 中国沙漠, 22(4): 333-338.
- 苏永中,赵哈林,张铜会. 2002c. 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, 13(7): 802-806.
- 王桂荣,张春兴. 1996. 科尔沁沙地种植不同作物与施肥对农作物生物效应的影响. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 19(2): 151-154.
- 王涛,吴薇,赵哈林,等. 2004a. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析. 中国沙漠, 24(5): 519-528.
- 王涛,朱震达,赵哈林. 2004b. 我国沙漠化研究的若干问题-4. 沙漠化的防治战略与途径. 中国沙漠, 24(2): 115-123.
- 王涛,朱震达. 2001. 中国北方沙漠化的若干问题. 第四纪研究, 21(1): 56-64.
- 王小龙. 2001. 喷灌条件下沙土地速效养分移动特性研究. 河南职业技术学院学报, 29(4): 28-30.
- 许文强,罗格平,陈曦. 2006. 干旱区绿洲-荒漠过渡带灌丛土壤属性研究. 应用生态学报, 17(4): 583-586.
- 姚丽,刘廷玺. 2005. 科尔沁沙地土壤化学特性研究. 内蒙古农业大学学报, 26(2): 35-38.
- 张华,何红,李锋瑞,等. 2005. 科尔沁沙地灌木对风沙土壤的生态效应. 地理研究, 24(5): 708-716.
- 张强,程滨,杨治平,等. 2006. 芦芽山鬼箭锦鸡儿灌丛营养特征及土壤养分分布规律. 应用生态学报, 17(12): 2287-2291.
- 张雄,山颖,张继平,等. 2006. 沙地衬膜水稻施肥效应与技术研究. 水土保持学报, 20(1): 139-142.
- 章明奎. 2004. 应用土壤测试磷评估砂土中磷的可淋洗性. 土壤学报, 41(6): 996-1000.
- 赵琼,曾德慧,陈伏生,等. 2004. 沙地樟子松人工林土壤磷库及其有效性初步研究. 生态学杂志, 23(5): 224-227.
- 赵哈林,李胜功,张铜会. 1998. 80年代科尔沁沙地沙漠化土地时空变化规律及成因分析. 中国沙漠, 18(增2): 1-9.
- 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 2002. 沙漠化过程中沙质旱作农田土壤环境的变化及其对生产力形成的影响. 水土保持学报, 16(4): 1-4.
- 赵文智. 1994. 河北坝上沙漠化地区土壤特性研究: 以丰宁试验区为例. 中国沙漠, 14(4): 53-59.
- 赵学勇,贺丽萍. 2002. 科尔沁沙地生态系统典型土壤养分空间分布特征. 中国沙漠, 22(4): 328-332.
- 周涛,杨文,白国胜,等. 2000. 风沙土酿酒葡萄基地磷素资源特征与生物有效性. 水土保持学报, 14(2): 50-54.
- 朱震达. 1991. 中国的脆弱生态带与土地荒漠化. 中国沙漠, 11(4): 11-22.
- Bonanomi G, Rietkerk M, Dekker SC, et al. 2008. Islands of fertility induce co-occurring negative and positive plant-soil feedbacks promoting coexistence. *Plant Ecology*, 197: 207-218.
- Chen GS, Zeng DH, Chen FS. 2004. Concentrations of foliar and surface soil in nutrients *Pinus* spp. plantations in relation to species and stand age in Zhanggutai sandy land, northeast China. *Journal of Forestry Research*, 15: 11-18.

- Cleveland CC , Townsend AR , Schmidt SK. 2002. Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests : Evidence from short-term laboratory incubations and field studies. *Ecosystems* , **5** : 680–691.
- Compton JS , Mallinson DJ , Glenn CR , *et al.* 2000. Variations in the global phosphorus cycle// Glenn CR , ed. *Marine Authigenesis : From Global to Microbial*. Society for Sedimentary Geology , Special Publication Number , **66** : 21–33.
- Feller IC , McKee KL , Whigham DF , *et al.* 2003. Nitrogen vs. phosphorus limitation across an ecotonal gradient in a mangrove forest. *Biogeochemistry* , **62** : 145–175.
- Hoffmann C , Funk R , Wieland R , *et al.* 2008. Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilin-gele grassland , Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments* , **72** : 792–807.
- Kennedy AC , Papndik RI. 1995. Microbial characteristics of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation* , **50** : 243–248.
- Larsen S. 1967. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy* , **19** : 151–210.
- Leinweber P , Meissner R , Eekhardt KU , *et al.* 1999. Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. *European Journal of Soil Science* , **50** : 413–424.
- Li FR , Zhao LY , Zhang H , *et al.* 2004. Wind erosion and air-borne dust deposition in farmland during spring in the Horqin Sandy Land of eastern Inner Mongolia , China. *Soil and Tillage and Research* , **75** : 121–130.
- McDowell RW , Sharpley AN. 2001. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *Journal of Environmental Quality* , **30** : 508–520.
- Newman EI. 1995. Phosphorus inputs to terrestrial ecosystem. *Journal of Ecology* , **83** : 713–726.
- Okin GS , Mahowald N , Chadwick OA , *et al.* 2004. Impact of desert dust on the biogeochemistry of phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* , **18** : GB2005 , doi :10.1029/2003GB002145.
- Schlesinger WH , Raikes JA , Hartley AE , *et al.* 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology* , **77** : 364–374.
- Schlesinger WH , Reynolds JF , Cunningham GL , *et al.* 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* , **247** : 1043–1048.
- Sundareshwar PV , Morris JT , Koepfler EK , *et al.* 2003. Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes. *Science* , **299** : 563–565.
- Turner BL , Hayarth PM. 2000. Phosphorus forms and concentrations in leachate under four grassland soil types. *Soil Science Society of America Journal* , **64** : 1090–1099.
- van Auken OW. 2000. Shrub invasions of North American semi-arid grassland. *Annual Review of Ecology and Systematics* , **31** : 197–215.
- Wezel A , Rajot JL , Herbrig C. 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments* , **44** : 383–398.
- Zaady E , Groffman P , Shachak M. 1996. Litter as a regulator of N and C dynamics in macrophytic patches in Negev desert soils. *Soil Biology and Biochemistry* , **28** : 39–46.
- Zhang MK , He ZL , Calvert DV , *et al.* 2002. Release potential of phosphorus in Florida sandy soils in relation to phosphorus fractions and adsorption capacity. *Journal of Environmental Science and Health* , **37** : 793–809.
- Zhao HL , Yi XY , Zhou RL , *et al.* 2006. Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin sandy farmland , Inner Mongolia. *Catena* , **65** : 71–79.

作者简介 周全来 男 ,1974 年 9 月出生 ,硕士 ,工程师。主要研究沙地土壤养分循环 ,发表论文 3 篇。E-mail :zhou-quanlai@126.com
责任编辑 王 伟
