

# 土壤可溶性有机氮的研究进展

张亚亚<sup>1,2</sup> 李 军<sup>1\*</sup> 郭 颖<sup>1,2</sup> 牛颖权<sup>1,2</sup> 王艺涵<sup>1,2</sup> 周雯雯<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; <sup>2</sup>天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

**摘 要** 可溶性有机氮(SON)是土壤氮素组成中最活跃的组分之一,在陆地生态系统氮循环及养分平衡方面起着重要作用。研究证明,SON既能通过矿化作用转化为矿质氮,也能被植物直接吸收利用。另外,SON流失可能会造成水生生态系统的富营养化,并加剧土壤系统温室气体N<sub>2</sub>O的排放。因此,土壤SON受到国内外多学科的广泛关注。本文概述了SON的来源、组成、提取、测试、生态功能及其流失的环境效应,并指出未来有待深入研究的问题,以期能为植物吸收利用氮素及生态系统氮循环的研究提供参考依据。

**关键词** 土壤; 可溶性有机氮; 氮循环; 环境效应

**Soluble organic nitrogen in soil: A review.** ZHANG Ya-ya<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1\*</sup>, GUO Ying<sup>1,2</sup>, NIU Ying-quan<sup>1,2</sup>, WANG Yi-han<sup>1,2</sup>, ZHOU Wen-wen<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup> *Tianjin Key Laboratory of Water Environment and Resources, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China*; <sup>2</sup> *College of Urban and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China*).

**Abstract:** Soluble organic nitrogen (SON) plays a significant role in nitrogen cycle and nutrient balance of terrestrial ecosystems, and is one of the most active constituents of soil nitrogen. SON can not only be transformed into mineral nitrogen through mineralization, but also be absorbed directly by plants. Meanwhile, SON loss may cause eutrophication in aquatic ecosystems, and aggravation of N<sub>2</sub>O emissions in soil ecosystems as well. Therefore, SON has aroused multidisciplinary attention. In order to provide a reference for studying plant uptake and utilization of nitrogen as well as nitrogen cycle in ecosystems, this paper reviewed advances in SON sources, components, extraction, determination, ecological functions, and environmental effects of its loss. In addition, some prospects for further study on SON in soil were also proposed.

**Key words:** soil; soluble organic nitrogen; nitrogen cycle; environmental effect.

可溶性氮素是指土壤中可以溶于水或稀盐溶液的氮素,是植物生长发育不可或缺的组分之一。可溶性氮素又可分为可溶性无机氮(SIN)和可溶性有机氮(SON)。SIN主要包括NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, SIN在植物营养中的重要性以及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N下渗地下水后对生态环境可能造成的影响是SIN研究的重点(Sandra *et al.*, 2010; 徐志伟等, 2014)。SON在土壤可溶性氮素组成中是一个不可忽视的组分,在土壤溶液中SON的浓度约为0.025~10 mg·L<sup>-1</sup>(Watson *et al.*, 2000; Perakis *et al.*, 2002; Si-

emens *et al.*, 2002; Vinther *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2015), 约占土壤溶液总氮的0.2%~2.1%(Haynes, 2005; Yang *et al.*, 2012)。尽管SON在土壤总氮中所占的比重很小,但却对植物营养及不同生态系统氮素循环起着重要的作用。Neff等(2003)提出SON在陆地生态系统氮循环中具有双重作用:一方面,SON可以直接被植物吸收利用,从而缩短陆地氮循环的周期;另一方面,SON的移动性相对较强,可随水分运移发生径流或淋溶从而污染水体,这是土壤有机氮在氮循环作用研究方面的一次重要突破。国外对加拿大不列颠哥伦比亚南部、麦克尼尔港附近的森林和魁北克圣希莱尔山脉、美国俄亥俄州南部森林、加利福尼亚州北部森林和纽约州白面山、德国图灵根州和下萨克森州、瑞典南部、芬兰中

国家重大科学研究计划项目(2013CB956401)、国家自然科学基金项目(41172315、41302285和41403082)和天津市水资源与水环境重点实验室开放基金资助。

收稿日期: 2015-09-23 接受日期: 2016-02-20

\* 通讯作者 E-mail: lijun5931@163.com

东部、北极、格陵兰岛西北部、新西兰北岛以及澳大利亚昆士兰州等地区的土壤 SON 进行了深入研究(表 1)。我国也从多个角度对 SON 进行了大量研究,主要集中在黄土高原、三江平原、青藏高原、东北平原、黄河三角洲、福建建瓯万木林自然保护区等(表 1)。国内外关于土壤 SON 的研究主要集中在亚热带、温带和寒带地区的森林、农田、草地及湿地生态系统,而对热带森林生态系统土壤 SON,尤其是 SON 的年际变化及生态功能研究甚少。因此,未来需要加强对热带土壤 SON 的组成和生态功能研究。已有研究发现,土壤中 SON 与 SIN 在来源、特性、转化及损失途径等方面存在很大差异(Hagedorn *et al.*, 2001)。本文旨在根据目前国内外的重要文献,概括 SON 的来源、组成、提取及测试方法、SON 的生态功能及其流失后的环境效应,并提出土壤 SON 未来主要的研究方向。

表 1 国内外 SON 研究的主要区域  
Table 1 Study areas of SON at home and abroad

研究区域	气候带	土地利用类型	SON (mg · kg <sup>-1</sup> )	TSN (mg · kg <sup>-1</sup> )	TN (mg · kg <sup>-1</sup> )	SON/TSN (%)	SON/TN (%)	参考文献
加拿大不列颠	北温带	林地(OL)	223~448	—	—	63~83	—	Kranabetter <i>et al.</i> , 2007
哥伦比亚南部		林地(0~20 cm)	10~17	—	—	70~96	—	
美国俄亥俄州南部森林	北温带	林地(0~10 cm)	8~10	—	—	22~26	—	Giai <i>et al.</i> , 2007
美国康涅狄格州	北温带	林地(OL)	199	—	—	—	—	Berthrong <i>et al.</i> , 2006
		林地(0~10 cm)	20	—	—	—	—	
德国图灵根州	北温带	林地(OL)	80~97	—	—	—	—	Zhong <i>et al.</i> , 2003
		林地(0~10 cm)	8~10	—	—	—	—	
芬兰中东部	北寒带	林地(OL)	23	—	—	—	—	Smolander <i>et al.</i> , 2005
新西兰北岛	南温带	草地	16~29	—	—	—	—	Ghani <i>et al.</i> , 2007
澳大利亚昆士兰州	亚热带	农田(0~20 cm)	152~263	—	—	—	—	Holst <i>et al.</i> , 2012
		农田(20~40 cm)	141~223	—	—	—	—	
黄土高原地区	北温带	黑垆土	24.75	48.3	1.9	51.25	2.54	杨绒等, 2007
		林地(OL)	248.26	324.39	5.69	76.52	4.36	
		林地(0~20 cm)	31.03	68.86	1.53	44.36	2.03	
三江平原	北温带	沼泽湿地	48.5	—	—	—	—	黄靖宇等, 2008
		湿地垦殖后的农田	21.34~36.37	—	—	—	—	
		弃耕还湿地	39.3	—	—	—	—	
		人工林地	42.4	—	—	—	—	
上海嘉定下西洋有机蔬果园	亚热带	蔬果园	16.6	38.69	0.15	42.9	11.1	葛体达等, 2009
福建建瓯万木林自然保护区	亚热带	林地(0~20 cm)	74.77	103.86	8.82	71.99	8.48	张彪等, 2010
黄河三角洲	北温带	林地(刺槐, 0~20 cm)	14.39	28.22	0.32	51	4.5	陈印平等, 2011
黄河三角洲	北温带	菜地	86.6	116.55	0.9	74.3	9.62	吕学军等, 2011
		果园	42.7	56.63	1.19	75.4	3.56	
		农田	58.6	67.51	1.4	86.8	4.19	
		未利用土地	20.1	25.09	0.57	80.1	3.35	
福建省建阳市	亚热带	人工草地	63.79~73.32	72.55~90.83	—	77.87~88.88	—	钟珍梅等, 2015

OL, 有机层; —, 无数据。

## 1 SON 的来源、组成

### 1.1 SON 的来源

目前, SON 的来源尚有争议。一般认为, SON 同可溶性有机物(SOM)的来源相同, 主要为新近凋落物和土壤腐殖质, 而土壤微生物生物量、有机质(包括根、叶残体)的分解、土壤胶体的解吸、根系代谢产物及分泌物、施入的氮肥、降雨淋溶及大气沉淀物等都是 SON 的重要来源(Dalva *et al.*, 1991; Flessa *et al.*, 2000; Uselman *et al.*, 2000; 杨玉盛等, 2003; Chen *et al.*, 2005; Filep *et al.*, 2011; Patricia *et al.*, 2015)。新近凋落物对 SON 有显著影响, Casals 等(1995)观察到松林土壤沥出液中绝大部分 SON 都来自于新近的凋落物层。McDowell 等(2004)研究发现, 腐殖质淋溶和微生物分解过程是可溶性有机物的一个重要来源, 这与 Zsolnay(1996)的研究结果

基本一致。另有研究认为,SON 可直接来源于土壤微生物( Yang *et al.* ,2012),也可间接来自微生物产生的胞外酶( Leiros *et al.* ,2000)。因此,对土壤微生物而言,土壤 SON 既是氮源也是氮库。Currie 等(1996)研究表明,农田每年施入 150 kg N · hm<sup>-2</sup> 的高氮处理,土壤 SON 含量增加了 2~3 倍,并且在低氮处理中 SON 含量也有显著增加。综上所述,土壤 SON 随着凋落物、微生物和根系分泌物、施入的有机肥料、降雨、温度、湿度、土地利用等的变化而变化。

1.2 SON 的组成

从化学形态看,SON 以含氮化合物如氨基酸、氨基糖、多肽、蛋白质等为主,其余部分包括酚类、单宁、多羟基类化合物和氨基酸-腐植酸复合物等( Paul *et al.* ,2005)。游离的氨基酸和蛋白质可被微生物迅速吸收和转化,不会在土壤中大量积累,而存在于腐殖质中的高分子量多酚化合物,其转化过程缓慢,是土壤 SON 流失至水体中的主体( Jones *et al.* ,2004)。土壤 SON 的组成还因土壤类型、气候条件、植被等因素而异(表 2)。Murphy 等(2000)认为,游离氨基酸仅占耕地土壤 SON 总量的 3%,氨基糖和杂环化合物平均约占 15%,其余为含氨基的其他化合物。Paul 等(2005)认为,蛋白质及多肽可占耕地土壤 SON 总量的 35%~57%。这与 Michalzik 等(1999)通过<sup>15</sup>N 核磁共振光谱分析得出的结果比较一致。Hannam 等(2003)发现,林地土壤中游离氨基酸占 SON 的 1%~1.5%。Jones 等(2002)、Holst 等(2012)研究表明,寒带及亚寒带林地土壤中自由氨基酸的含量(10%~20%)比亚热带、温带林地(<10%)含量高。Yu 等(2002)研究发现,加利福尼亚东北部森林土壤中游离氨基酸以及蛋白质、多肽水解而成的复合氨基酸共占 SON 的 59%~78%,因而,游离氨基酸、蛋白质及多肽是森林土壤,尤其是森林土壤有机质层 SON 的最主要成分。Paul 等(2005)对苏格兰草地的研究表明,提取的游离氨基酸占土

壤 SON 的比例为 5%~26%。但也有研究认为,林地土壤溶液的有机态氮仅有很小的一部分以游离氨基酸和蛋白质形式存在,大部分以亲水和疏水的有机酸存在( Qualls *et al.* ,1991)。Currie 等(1996)发现,凋落物渗滤液中 SON 的主要成分为半分解状态的植物、微生物、动物残体形成的难以降解的有机酸。但目前对于 SON 存在于亲水性有机酸还是疏水性有机酸中尚无定论。Smolander 等(2005)和 Kiikkilä 等(2006)研究认为,林地表层提取的 SOM 可分为疏水性酸、疏水性中性物、亲水性酸、亲水性碱和亲水性中性物,且发现 SON 的大部分载体是疏水性酸(比重>50%),但以亲水性酸、碱和中性物为载体的 SON 也占相当比例。也有部分学者认为,在凋落物残体和泥碳组成的有机物层疏水性和亲水性酸浓度大致相当( Tipping *et al.* ,1999)。目前,对于土壤中 SON 的组成尚未达成一致结论,未来仍然需要加强不同土壤类型中 SON 组成的对比研究。

2 SON 的提取和测试

2.1 SON 的提取

土壤 SON 可用 H<sub>2</sub>O、2 mol · L<sup>-1</sup> KCl、0.5 mol · L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、0.01 mol · L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 等溶液浸提,也可用电超滤法( electroultrafiltration, 简称 EUF )提取。H<sub>2</sub>O 和盐溶液在土壤 SON 提取上各有不足,H<sub>2</sub>O 溶液浸提会导致黏土分散而难获得清澈溶液以供分析( Young *et al.* ,1982),盐溶液可能会影响土表吸收平衡而释放出有机氮( Murphy *et al.* ,2000)。Chen 等(2005)发现,浸提液的种类对 SON 的含量有很大影响,同一土壤用 KCl 溶液浸提的 SON 含量最高,K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液次之,H<sub>2</sub>O 溶液浸提的 SON 含量最低,不同浸提剂提取的 SON 含量之间存在显著的相关性。Burtona 等(2007)对比了澳大利亚亚热带土壤经过 5 种预处理后测得的 SON 含量,发现加热(100 °C, 4 h)的 2 mol · L<sup>-1</sup> KCl 溶液作为浸提剂提取的 SON 含量最多,热水溶液(70 °C,18 h)提取的较多,KCl

表 2 不同类型土壤 SON 的组成及含量(%)  
Table 2 The composition and content of SON in different types of soils

土壤类型	蛋白质及多肽	游离氨基酸	氨基糖	杂环化合物	数据来源
耕地	35~57 *	3	15	15	Murphy <i>et al.</i> ,2000;Paul <i>et al.</i> ,2005
林地	-	1~1.5	-	-	Hannam <i>et al.</i> ,2003
寒带及亚寒带森林	-	10~20	-	-	Jones <i>et al.</i> ,2002
亚热带及温带森林	-	<10	-	-	Holst <i>et al.</i> ,2012
草地	-	5~26	-	-	Paul <i>et al.</i> ,2005

\*,各成分占土壤 SON 总量的百分比;- ,无数据。

溶液提取的 SON 次之,提取 SON 含量最少的是  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{SO}_4$  以及  $\text{H}_2\text{O}$  溶液。Murphy 等(2000)研究发现,在有机质含量较高的粘土中,KCl 提取的 SON 是  $\text{K}_2\text{SO}_4$  提取的 1.2~1.4 倍。Zhong 等(2003)对德国温带森林土壤的实验结果表明,KCl 和  $\text{K}_2\text{SO}_4$  所提取的土壤 SON 含量之间具有较高的相关性,并且盐溶液提取 SON 的量大约是  $\text{H}_2\text{O}$  溶液提取量的几倍到几十倍之多。邹玉亮等(2012)比较了 3 种土样处理方式下 SON 浸提量的差异,结果表明,土壤预处理方式显著影响 SON 含量的测定,烘干土 SON 含量显著高于风干土和湿土,风干土较湿土 SON 含量略多,但差异不显著。周碧青等(2013)以中亚热带茶园生态系统为研究对象,发现 3 种提取方法下提取的茶园土壤不同土层的 SON 含量差异均达显著和极显著水平,SON 的含量均表现为  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl} > \text{H}_2\text{O} (70^\circ\text{C}) > \text{H}_2\text{O} (\text{室温})$ 。EUF 是将电场作用于土壤悬浊液,使其以透过滤膜的扩散方式分离可溶性氮,该方法既能提取无机氮,又能提取有机氮(邵孝侯等,1991)。Mengel 等(1999)发现,  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$  浸提的 SON 明显比 EUF 高,因此,EUF 与浸提法相比结果会产生较大差异,且存在费时、重复性差、成本高的缺点。综上所述,目前国内普遍认可盐溶液浸提法,但在土壤样品处理过程中,由于不同的浸提液会影响有机氮组分的溶解性及解吸性,使得测定结果相差较远。因此,在进行土壤 SON 相关方面的研究时,应综合考虑样地土壤质地、土壤有机质含量,选用合适的土壤浸提剂及合适的处理方法对土壤 SON 进行测定。

## 2.2 SON 的测试

土壤 SON 通常是由 TSN 差减 SIN 来获得。测定土壤浸提液 TSN 的方法有凯氏法、碱性  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  氧化法、离子色谱法、纳氏比色法等。土壤浸提液  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  可采用酚二磺酸分光光度法、硝酸离子选择电极法、极谱法、离子色谱法、色相气谱法、流动注射分析法、毛细管电泳分析法、紫外分光光度法及连续流动分析法测定。土壤浸提液  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  可以用氨基苯磺酸- $\alpha$ -奈乙二胺光度法(N-(1-萘基)-乙二胺光度法)、离子色谱法及连续流动分析法测定,但由于土壤  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  极低且极易氧化为  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  或还原为 NO 等气态氧化物,因此一般可忽略不计。土壤浸提液  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  可采用靛酚蓝比色法、纳氏试剂法或使用连续流动分析仪测定。

最早测定 TSN 含量一般采用凯氏法,但此法操

作繁琐,测定结果重现性差,产生的废弃物不仅对人体有害还污染环境,而且所测的氮并未包括铵态氮和有机氮,所以不适合铵态氮和有机氮含量较高的土壤。20 世纪 80 年代,Koroleff(1983)提出以碱性  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  为氧化剂,在一定条件下( $120^\circ\text{C}$ , 30 min)将溶液中的 SON、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  转变为硝态氮,通过测定硝态氮来确定溶液中 TSN 的含量,溶液 TSN 与铵态氮、硝态氮和亚硝态氮之和的差值即为土壤 SON 的含量。该方法操作简便,且适合批量分析,先后被一些学者用于污水、海水 TSN 含量的测定。用  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  氧化法测定溶液全氮时,不同学者所采用的氧化剂浓度有所区别,样品和氧化剂的体积比也有差异。其中,所用  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  和 NaOH 的浓度范围分别为  $10 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $0.075 \sim 0.375 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。有学者发现,3%  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  与  $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH 配合为适宜的氧化剂,在尿素和氧化剂等体积配比时,测定上限是  $80 \text{ mg N} \cdot \text{L}^{-1}$ (周建斌等,1998)。

现代仪器的发展在很大程度上也推进了对土壤 SON 的研究。Merriam 等(1996)提出高温催化氧化技术(high temperature catalytic oxidation, HTCO)来测定土壤 TSN 的含量,其所测结果与采用  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  氧化法所获得的测定结果之间存在较强相关性,测定范围为  $0.03 \sim 10.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且具有快速、批量、不需使用强酸或强碱等特点。宋歌等(2007)认为,硝酸离子选择电极法易受土壤浸提液中各种干扰离子和 pH 的影响,且电极液膜本身也不稳定。另外,极谱法、色谱法和流动注射分析法的仪器价格昂贵,且技术操作要求高,而紫外分光光度法所用仪器价格便宜,在土壤浸提液或处理水样的硝酸盐含量测定中,可靠性已得到广泛承认。卢红玲等(2008)研究发现,碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定的 TSN 与将该溶液氧化后采用连续流动分析仪(AA3)对硝态氮测定的结果一致。

## 3 SON 的生态功能

### 3.1 SON 和可溶性有机碳(SOC)的关系

一般认为,SON 的浓度和通量与 SOC 的显著相关,并受土层深度和施肥等因素的影响。Michalzik 等(2001)汇总了北温带 42 个森林样地的 SOC 和 SON 的浓度和通量数据,发现土壤样地 SOC/SON (质量比,下同)的比值随土层深度的增加而减小。Qualls 等(2002)的研究也印证了这一结论,他们以美国北卡罗来纳州阿巴拉契亚山脉南部的 Nantaha-

1a 段土壤为样本,测得土壤有机质层(O 层)、淋溶层(A 层)、淀积层(B 层)的 SOC/SON 比值介于 34~40,母质层(C 层)约为 20,得出上层土壤 SOC/SON 比值高于下层土壤。SOC/SON 的比值除受土层深度的影响,还与施肥等因素有关。McDowell 等(2004)研究发现,马萨诸塞州哈佛林未施肥森林土壤 SOC/SON 比值介于 32~39,施用氮肥后比值减少到 10~22,这一变化是因为随着氮肥的施用,氨基酸和氨基糖的浓度增加,导致 SON 浓度也有所增加, SOC/SON 比值降低。但也有学者报道, SOC 和 SON 有一定的相关性,但相关性不显著(Kaiser *et al.*, 2000)。总之, SOC 和 SON 之间的响应机理尚有待进一步研究。

3.2 植物及微生物对 SON 的利用

通常认为植物主要利用无机氮,有机氮需经过矿化后才能被植物吸收利用,而这被认为是植物利用有机氮的一种传统模型(图 1a, Chen *et al.*, 2008)。研究证明, SON 对植物具有双重作用,一方面通过矿化作用转化成无机氮为植物提供氮源,另一方面也是菌根植物的直接氮源(Neff *et al.*, 2003),如一种杜鹃花科的矮化灌木就可通过菌根共生体直接吸收有机态氮(Read, 1993)。同时,在极地、高山等寒冷生态系统中,氨基酸较无机氮更利于植物吸收(Jones *et al.*, 2002)。这些地区受人类活动影响较小,冻土分布广,微生物活性低,氮矿化速率极低而无法满足植物需要, SON 就成为植物利用的主要氮源(王洁等, 2015)。Chen 等(2008)认为, SON 部分转化为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 部分被植物直接吸收,

是植物吸收利用有机氮的一种新型模式,有利调节了有机氮在整个生态系统中的可利用性(图 1b, Chen *et al.*, 2008)。植物直接吸收 SON 缩短了 N 循环的周期,是其利用氮素的一种重要形式。另外,一些微生物也可直接利用低分子量 SON,且利用 SON 生成的产物是 SIN 的 5 倍之多(Wiegner *et al.*, 2006)。因此,植物及微生物对 SON 的吸收利用应受到更多关注,并结合生物化学等理论方法,将研究深入到所利用 SON 的形态结构及分子水平上。

土壤氮的含量和组成决定着植物对氮素的利用形式,国内外学者针对不同含氮量土壤中植物及微生物吸收利用氮的变化特征及影响因素等进行了深入研究。在寒带、北极和高山等含氮量低的生态系统中,植物和微生物主要竞争有机氮,一部分氨基酸被微生物吸收利用,而另一小部分氨基酸将扩散到根部,为其提供氮素(Xu *et al.*, 2006, 图 2A)。随着  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量的增加,植物和微生物将会竞争这些有限的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 一部分硝化细菌会进行硝化作用(Miller *et al.*, 2003),同时植物也可能继续直接吸收有机氮(图 2B),这种情况在凋落物含氮量和分解作用都比较低的温带森林土壤中较为常见(崔晓阳等, 2005)。随着  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  显著增多,硝化作用增强,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量也会随之增加,这种情况通常发生在温带落叶阔叶林土壤中(苗艳芳等, 2014),如图 2C。在氮可用性很高的地区,如一些农业生态系统或热带雨林中(王科等, 2015),硝化细菌通过硝化作用生成硝酸盐,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在氮循环中占据主导地位,植物将以吸收  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  为主,如图 2D 所示。

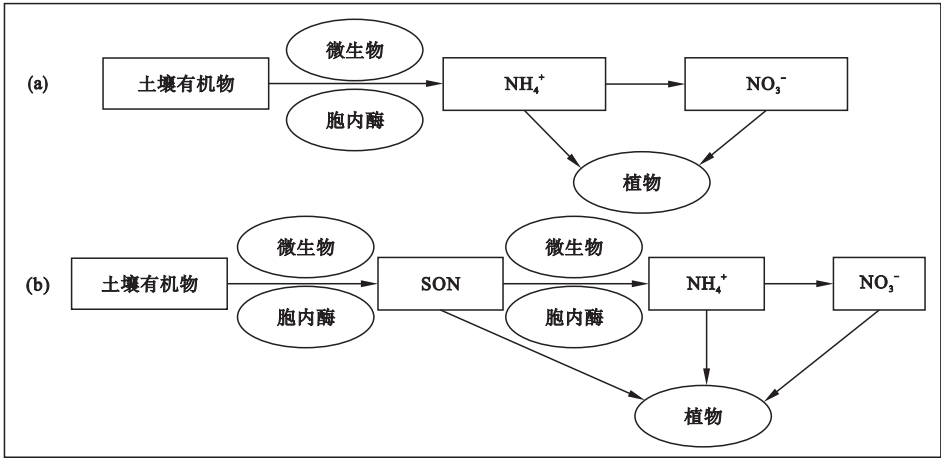


图 1 陆地生态系统中植物吸收有机氮的传统模式(a)和改进模式(b)图(据 Chen *et al.*, 2008)  
Fig.1 Classical model (a) and improved model (b) of plants uptake organic N in terrestrial ecosystems

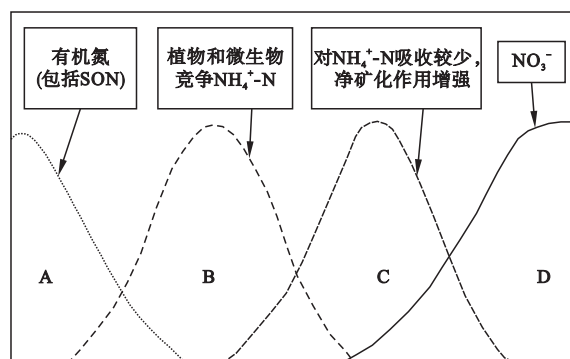


图2 土壤氮含量和组成决定氮利用形式模式图(据 Schimel *et al.*, 2004)

Fig.2 The model of N availability regimes, impacted by soil N forms and components

#### 4 SON 流失的环境效应

淋溶损失和温室气体排放是土壤氮素流失的两种主要方式,而 SON 淋失是土壤氮素流失的重要途径,如早在 100 多年前就有研究发现农田土壤淋出液中含较高 SON(van Kessel *et al.*, 2009)。同时,土壤也是温室气体  $N_2O$  排放源的重要组成部分,且 SON 对  $N_2O$  排放具有重要影响(Song *et al.*, 2013)。总之,SON 流失会抑制土壤氮的聚集和有效性,减少陆地生态系统氮库存,并可能导致地表水、地下水环境质量下降甚至影响全球气候变化。

##### 4.1 土壤肥力下降

在土壤氮循环和植物利用过程中,SON 淋溶占氮素总淋溶量的比重较大。Zhou 等(2003)利用含有机态氮的污水进行淋洗土柱,发现加入的铵态氮几乎全被保持在土壤中,而约 65%~75%的有机态氮发生淋失。Qualls 等(1991)估计,森林土壤 SON 的流失量约占氮素总损失量的 28%。研究表明,如果每年施氮量  $\geq 10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,且每年氮素总淋溶量  $> 19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,那么 SON 对氮素淋溶的贡献通常  $\leq 10\%$  (Solinger *et al.*, 2001)。欧洲 NITREX (Nitrogen Saturation Experiments) 项目显示,如果每年施氮量超过  $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,则每年 SON 的淋溶将增加到  $9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占淋溶总氮的 19% (Gundersen *et al.*, 1998)。综上所述,土壤 SON 淋失会将养分一并带走,导致再循环时可供土壤和植物利用的氮素出现逐次递减的现象,致使土壤肥力、农业生产水平甚至作物蛋白质含量下降,并逐步形成土壤侵蚀等。

##### 4.2 水体富营养化

有关水体富营养化的研究通常统计总氮、总磷

等指标,缺乏专门针对土壤 SON 的报道。已有研究发现,土壤 SON 流失到地表水和地下水会导致水体富营养化(van Kessel *et al.*, 2009)。McClain 等(1997)比较了亚马逊 Barro Branco 和 Campina 流域土壤(包括植被、凋落物)及地表水 SON 的含量,发现流失到水体中的 SON 分别占 Barro Branco 和 Campina 流域土壤 SON 的 1.2% 和 8%,说明土壤 SON 流失是水体溶解性有机氮的一个重要来源。并且,如果有机肥施用量过大或过于集中,地表径流可携带陆地生态系统中的 SON 进入地表水体,使水体中氮含量迅速增加,而封闭型水体更面临富营养化的威胁(左海军,2008)。

##### 4.3 增加 $N_2O$ 排放

大气中的  $CO_2$  和  $N_2O$  都是重要的温室气体,  $CO_2$  和  $N_2O$  对全球变暖的贡献分别为 60% 和 5% (Rodhe, 1990)。虽然  $N_2O$  在大气中的贡献较低,但其单分子的增温潜势却是  $CO_2$  的 265 倍,且在大气中的停留时间长达 121 年(IPCC, 2014)。农田土壤是  $N_2O$  的重要排放源,据估计,大气中每年有 80%~90% 的  $N_2O$  来源于土壤,而土壤中 SOC、SON 的含量和动态变化会对  $CO_2$ 、 $N_2O$  的排放过程产生重要影响(Song *et al.*, 2013)。李永夫等(2010)发现,不同施肥处理的毛竹林土壤的  $CO_2$  和  $N_2O$  的排放速率分别与土壤 SOC 和 SON 含量呈显著的相关性。另外,李彬彬等(2014)研究也表明,土壤  $CO_2$  和  $N_2O$  的排放通量与土壤 SOC 和 SON 的含量呈显著的相关关系。Qiu 等(2015)以禹城农业试验站小麦田为样地,发现  $N_2O$  排放通量与 SON 浓度呈正相关关系,并得出土壤  $CO_2$  和  $N_2O$  的排放通量与土壤水分和温度、微生物生物量以及可溶性有机物有关的结论。

#### 5 结 语

从生物地球化学循环的角度看,土壤 SON 是大气、陆地、江河、湖泊以及海洋等生态系统中氮循环的一个重要组成部分,因此,研究土壤 SON 对全球生态系统碳、氮循环具有重要意义。未来有待深入研究的有:(1)量化不同生态系统 SON 库的大小和组成,尤其是弥补热带森林生态系统土壤 SON 的空白;(2)研究不同土壤类型中 SON 的组分及各组分的生物化学特性,尤其是富含腐殖质的大分子难分解部分;(3)建立土壤 SON 提取和分析的标准方法,提高不同研究结果的可比性;(4)实地监测 SON 的

动态变化以及发展 SON 动态仿真模型,探究长时间和大空间尺度 SON 通量对环境条件的响应及其在全球气候变化中的作用。

## 参考文献

- 陈印平,夏江宝,王进闯,等. 2011. 黄河三角洲盐碱地人工林土壤可溶性有机氮含量及特性. 水土保持学报, **25**(4): 121-130.
- 崔晓阳,宋金凤. 2005. 原始森林土壤  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  生境特征与某些针叶树种的适应性. 生态学报, **25**(11): 3082-3092.
- 葛体达,唐东梅,宋世威,等. 2009. 不同园艺生产系统土壤可溶性有机氮差异. 应用生态学报, **20**(2): 331-336.
- 黄靖宇,宋长春,宋艳宇,等. 2008. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响. 环境科学, **29**(5): 1380-1387.
- 李彬彬,马军花,武兰芳. 2014. 土壤溶解性有机物对  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. 生态学报, **34**(16): 4690-4697.
- 李永夫,姜培坤,刘娟,等. 2010. 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响. 林业科学, **46**(12): 165-170.
- 卢红玲,李世清,金发会,等. 2008. 可溶性有机氮在评价土壤供氮能力中的作用与效果. 中国农业科学, **41**(4): 1073-1082.
- 吕学军,刘庆,陈印平,等. 2011. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响. 农业现代化研究, **32**(4): 505-508.
- 苗艳芳,李生秀,扶艳艳,等. 2014. 旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系. 应用生态学报, **25**(4): 1013-1021.
- 邵孝侯, Houba VJG. 1991. 土壤有效氮测定方法的研究进展. 国外农业环境保护, (3): 17-20.
- 宋歌,孙波,教剑英. 2007. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较. 土壤学报, **44**(2): 288-293.
- 王洁,杨曦,朱兆洲,等. 2015. 青藏高原土壤可溶性氮组成特征. 生态学杂志, **34**(6): 1660-1666.
- 王科,赵亚妮,王佳锐,等. 2015. 施氮及种植模式对玉米氮素利用和土壤硝态氮含量的影响. 水土保持学报, **29**(4): 121-126.
- 徐志伟,张心昱,于贵瑞,等. 2014. 中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展. 环境科学, **35**(8): 3230-3238.
- 杨绒,严德翼,周建斌,等. 2007. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性. 生态学报, **27**(4): 1397-1403.
- 杨玉盛,郭剑芬,陈光水,等. 2003. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动. 生态学报, **23**(3): 547-558.
- 张彪,高人,杨玉盛,等. 2010. 万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量. 应用生态学报, **21**(7): 1635-1640.
- 钟珍梅,黄秀声,翁伯琦,等. 2015. 沼液对种植狼尾草的山地红壤可溶性有机氮和土壤微生物特征的影响. 水土保持学报, **29**(5): 111-116.
- 周碧青,张黎明,毛艳玲,等. 2013. 不同提取方法下茶园土壤可溶性有机氮含量差异. 福建农林大学学报:自然科学版, **42**(3): 317-322.
- 周建斌,李生秀. 1998. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择. 植物营养与肥料学报, **4**(3): 299-304.
- 邹玉亮,张小琴,马立峰,等. 2012. 可溶性有机氮无机氮浸提方法的比较. 江苏农业科学, **40**(10): 260-264.
- 左海军,张奇,徐力刚. 2008. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究. 环境污染与防治, **30**(12): 83-89.
- Berthrong ST, Finzi AC. 2006. Amino acid cycling in three cold-temperate forests of the northeastern USA. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 861-869.
- Burtona J, Chen CR, Xu ZH, et al. 2007. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**: 2723-2734.
- Casals P, Romanya J, Cortina JF, et al. 1995. Nitrogen supply rate in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests of contrasting slope aspect. *Plant and Soil*, **62**: 67-73.
- Chen CR, Xu ZH, Zhang SL, et al. 2005. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia. *Plant and Soil*, **277**: 285-297.
- Chen CR, Xu ZH. 2008. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils. *Journal of Soils and Sediments*, **8**: 363-378.
- Currie WS, Aber JD, McDowell WH, et al. 1996. Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests. *Biogeochemistry*, **35**: 471-505.
- Dalva M, Moore TR. 1991. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchment. *Biogeochemistry*, **15**: 1-19.
- Filep T, Rékási M. 2011. Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary. *Geoderma*, **162**: 312-318.
- Flessa H, Ludwig B, Heil B, et al. 2000. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term experiment in Halle, Germany, determined by  $^{13}\text{C}$  natural abundance. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **163**: 157-163.
- Ghani A, Dexter M, Carran RA, et al. 2007. Dissolved organic nitrogen and carbon in pastoral soils: The New Zealand experience. *European Journal of Soil Science*, **58**: 832-843.
- Giai C, Boerner R. 2007. Effects of ecological restoration on microbial activity, microbial functional diversity, and soil organic matter in mixed-oak forests of southern Ohio, USA. *Applied Soil Ecology*, **35**: 281-290.
- Gundersen P, Emmett BA, Kjgnaas OJ, et al. 1998. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: A synthe-

- sis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, **101**: 37–55.
- Hagedorn F, Bucher JB, Schlegli P. 2001. Contrasting dynamics of dissolved inorganic and organic nitrogen in soil and surface waters of forested catchments with Gleysols. *Geoderma*, **100**: 173–192.
- Hannam KD, Prescott CE. 2003. Soluble organic nitrogen in forests and adjacent clear cuts in British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, **33**: 1709–1718.
- Haynes RJ. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview. *Advances in Agronomy*, **85**: 221–268.
- Holst J, Brackin R, Robinson N, *et al.* 2012. Soluble inorganic and organic nitrogen in two Australian soils under sugarcane cultivation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **155**: 16–26.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland, 87.
- Jones DL, Kielland K. 2002. Soil amino acid turnover dominates the nitrogen flux in permafrost-dominated taiga forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**: 209–219.
- Jones DL, Shannon D, Murphy DV, *et al.* 2004. Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 749–756.
- Kaiser K, Zech W. 2000. Sorption of dissolved organic nitrogen by acid subsoil horizons and individual mineral phases. *European Journal of Soil Science*, **51**: 403–411.
- Kiikkilä O, Kitunen V, Smolander A. 2006. Dissolved soil organic matter from surface organic horizons under birch and conifers: Degradation in relation to chemical characteristics. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 737–746.
- Koroleff F. 1983. Simultaneous oxidation of nitrogen and phosphorus compounds by persulfate// Grasshoff K, Eberhardt M, eds. *Methods of Sea water Analysis*. Verlag Chemie, Weinheimer, FRG: 168–169.
- Kranabetter JM, Dawson CR, Dunn DE. 2007. Indices of dissolved organic nitrogen, ammonium and nitrate across productivity gradients of boreal forests. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**: 3147–3158.
- Leiros MC, Trasar-Cepeda C, Seoane S, *et al.* 2000. Biochemical properties of acid soils under climate vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate humid zone (Galicia, NW Spain): Specific parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 747–755.
- McClain ME, Richey JE, Brandes JA. 1997. Dissolved organic matter and terrestrial-lotic linkages in the central Amazon basin of Brazil. *Global Biogeochemical Cycles*, **11**: 295–311.
- McDowell WH, Magill AH, Aitkenhead-Peterson JA, *et al.* 2004. Effects of chronic nitrogen amendment on dissolved organic matter and inorganic nitrogen in soil solution. *Forest Ecology and Management*, **196**: 29–41.
- Mengel K, Schneider B, Kosegarten H. 1999. Nitrogen compounds extracted by electroultrafiltration (EUF) or CaCl<sub>2</sub> solution and their relationships to nitrogen mineralization in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **162**: 139–148.
- Merriam J, McDowell WH, Currie WS. 1996. A high-temperature catalytic oxidation technique for determining total dissolved nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, **60**: 1050–1055.
- Michalzik B, Kalbitz K, Park JH, *et al.* 2001. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen: A synthesis for temperate forests. *Biogeochemistry*, **52**: 173–205.
- Michalzik B, Müller T, Stadler B. 1999. Aphids on Norway spruce and their effects on forest-floor solution chemistry. *Forest Ecology and Management*, **118**: 1–10.
- Miller AE, Bowman WD. 2003. Alpine plants show species-level differences in the uptake of organic and inorganic nitrogen. *Plant and Soil*, **250**: 283–292.
- Murphy DV, Macdonald AJ, Stockdale EA, *et al.* 2000. Soluble organic nitrogen in agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, **30**: 374–387.
- Neff JC, Chapin FS III, Vitousek PM. 2003. Breaks in the cycle: Dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **1**: 205–211.
- Patricia AS, Alexandra GPG, William ZM, *et al.* 2015. Atmospheric organic and inorganic nitrogen inputs to coastal urban and montane Atlantic Forest sites in southeastern Brazil. *Atmospheric Research*, **160**: 126–137.
- Paul JP, Williams BL. 2005. Contribution of alpha-amino N to extractable organic nitrogen (SON) in three soil types from the Scottish uplands. *Soil Biology and Biochemistry*, **37**: 801–803.
- Perakis SS, Hedin LO. 2002. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature*, **415**: 416–419.
- Qiu QY, Wu LF, Ouyang Z, *et al.* 2015. Effects of plant-derived dissolved organic matter (DOM) on soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and soil carbon and nitrogen sequestrations. *Applied Soil Ecology*, **96**: 122–130.
- Qualls RG, Haines BL, Swank WT, *et al.* 2002. Retention of soluble organic nutrients by a forested ecosystem. *Biogeochemistry*, **61**: 135–171.
- Qualls RG, Haines BL, Swank WT. 1991. Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest. *Ecology*, **72**: 254–266.
- Qualls RG, Haines BL. 1991. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, **55**: 1112–1123.
- Read DJ. 1993. Plant microbe mutualism and community structure// Schulze ED, eds. *Biodiversity and ecosystem function*. Berlin: Springer-Verlag: 181–203.
- Rodhe H. 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, **248**: 1217–1219.
- Sandra J, Torgny N, Kerstin HD. 2010. Nitrogen compounds in soil solutions of agricultural land. *Soil Biology and Bio-*

- chemistry, **42**: 2325–2330.
- Schimel JP, Bennett J. 2004. Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm. *Ecology*, **85**: 591–602.
- Siemens J, Kaupenjohann M. 2002. Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **165**: 675–681.
- Smolander A, Loponen J, Suominen K, *et al.* 2005. Organic matter characteristics and C and N transformations in the humus layer under two tree species, *Betula pendula* and *Picea abies*. *Soil Biology and Biochemistry*, **37**: 1309–1318.
- Solinger S, Kabitz K, Matzner E. 2001. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a Central European deciduous forest. *Biogeochemistry*, **55**: 327–349.
- Song G, Zhao X, Wang SQ, *et al.* 2015. Dissolved organic nitrogen leaching from rice-wheat rotated agroecosystem in southern China. *Pedosphere*, **25**: 93–102.
- Song LN, Zhang YM, Hu CS, *et al.* 2013. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, **21**: 297–307.
- Tipping E, Woof C, Rigg E, *et al.* 1999. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. *Environment International*, **25**: 83–95.
- Usselman SM, Qualls RG, Thomas RB. 2000. Effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub>, temperature, and soil N availability on root exudation of dissolved organic carbon by a N-fixing tree (*Robinia pseudoacacia* L.). *Plant and Soil*, **222**: 191–202.
- van Kessel C, Clough T, van Groenigen JW. 2009. Dissolved organic nitrogen: An overlooked pathway of nitrogen loss from agricultural systems? *Journal of Environmental Quality*, **38**: 393–401.
- Vinther FP, Hansen EM, Eriksen J. 2006. Leaching of soil organic carbon and nitrogen in sandy soils after cultivating grass-clover swards. *Biology and Fertility of Soils*, **43**: 12–19.
- Watson CJ, Jordan C, Lennox SD, *et al.* 2000. Organic nitrogen in drainage water from grassland in Northern Ireland. *Journal of Environmental Quality*, **29**: 1233–1238.
- Wiegner TN, Seitzinger SP, Glibert PM, *et al.* 2006. Bioavailability of dissolved organic nitrogen and carbon from nine rivers in the eastern United States. *Aquatic Microbial Ecology*, **43**: 277–287.
- Xu XL, Ouyang H, Kuzyakov Y, *et al.* 2006. Significance of organic nitrogen acquisition for dominant plant species in an alpine meadow on the Tibet plateau, China. *Plant and Soil*, **285**: 221–231.
- Yang K, Zhu JJ, Yan QL. 2012. Soil enzyme activities as potential indicators of soluble organic nitrogen pools in forest ecosystems of Northeast China. *Annals of Forest Science*, **69**: 795–803.
- Young JL, Aldag RW. 1982. Nitrogen in agricultural soils. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Yu Z, Zhang Q, Kraus TEC, *et al.* 2002. Contribution of amino compounds to dissolved organic nitrogen in forest soils. *Biogeochemistry*, **61**: 173–198.
- Zhong Z, Makeschin F. 2003. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **35**: 333–338.
- Zhou JB, Green M, Shaviv A. 2003. Mineralization of organic N originating in treated effluent used for irrigation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **67**: 205–213.
- Zsolnay A. 1996. Dissolved humus in soil waters// Piccolo A, eds. Humic Substances in Terrestrial Ecosystems. Amsterdam; Elsevier: 171–223.

---

作者简介 张亚亚,女,1991年生,硕士研究生,主要从事环境科学研究。E-mail: yyzhang0040@163.com  
责任编辑 魏中青

---