

土体构型对土壤水氮储运的影响研究进展^①

刘愫倩^{1,2}, 徐绍辉¹, 李晓鹏², 闫一凡², 赵永超², 刘建立^{2*}

(1 青岛大学环境科学系, 山东青岛 266071; 2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 土体构型是土壤剖面中不同质地层次的排列、组合状况, 其对土壤水分、溶质运移过程和作物生长等均具有显著影响, 具有重要的农学和环境意义。本文对该领域的研究动态和最新进展作了综述, 重点探讨了土体构型对土壤水分和氮素储存、运动过程的影响机理及其农学效应, 并对今后有关土体构型的研究和改良技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 土体构型; 水分运动; 氮素储运; 改良技术

中图分类号: S152.4

土体构型(soil configuration)是土壤的结构形态, 是整个土体各层次的分布、排列和组合状况, 一般由自然和人为作用形成, 是发育在土壤剖面尺度上的物理非均质现象^[1]。土体构型作为农业生产重要的立地条件之一, 不仅深刻影响着水分、养分在土壤中的储存、运移以及作物的根系生长, 而且在较大程度上决定了农田的地力水平和农作物的产量^[2]。因此, 可视为构成耕作土壤肥力的基础。

土壤中的水分和氮素是作物生长状况和农田生产力水平的重要决定因素, 如何提高土体的水分涵养能力和氮素利用率、减少因氮素淋失所造成的深层土壤及地下水污染等一直是我国农业生产的重要研究课题^[3]。要解决这些问题, 不但需要从水肥耦合调控、作物品种改良、新肥料研发等方面入手, 还需要深刻认识到土壤本身对水氮储运的重要作用。

土体构型对土壤水分和溶质运移影响的研究, 涉及结构化土壤、层状土壤等剖面尺度的空间非均质性 or 优势流过程, 一直都是国内外相关领域的热点和难点问题^[4-6]。诸多研究均表明, 土体构型对土壤水氮储存、运移过程的影响, 主要是由于构成土壤剖面的各土层理化性状存在显著差异, 导致土层间出现水分和溶质运移的突变界面, 不同土体构型剖面中砂黏性质及厚度的不同会导致剖面土壤物理性质的变化, 改变土体对水分和氮肥的保持能力和作物的吸收能力, 使得水氮在土体、作物、环境间的去向比例分配发生

变化^[7-8]。

土体构型对土壤水氮储运、农田地力、作物产量等的影响, 即土体构型的农学效应, 目前国内外已有较多的文献报道, 特别是作物根系影响范围内土壤质地层次组合变化的研究^[9-11], 在田间全剖面条件下开展的研究亦在受到更多研究者的重视; 近年来, 相关研究已不仅仅局限在单纯的农学或土壤学领域, 而是拓展至环境学、生态学等多个学科范畴^[12-13]。

本文以土体构型的农学效应为重点, 对近年来有关土体构型对土壤水氮储存、运移过程以及农田地力影响方面的研究作了系统性的梳理和评述, 并对该领域今后可能的发展方向进行展望, 对环境学、生态学等其他领域研究工作有一定的参考价值。

1 土体构型的分类方法和研究技术

土体构型识别和划分的基础是土壤质地类型。土壤质地分类制常见有: 国际制、卡钦斯基制(苏联制)、美国制和中国制等, 将土壤按粒级分为砂、粉、黏等^[14]。严昶升等^[15]在此基础上提出以土壤质地和孔隙组成为指标来分类土体构型并命名。土壤质地是区分土壤的基础, 孔隙组成则可以反映不同土层的通透性, 二者结合可以较确切地反映土壤垒结构造, 比较标准也相对清晰一致。后来的研究中更是引入了表达土壤质地层次排列的馅、底、蒙金, 表达剖面形态的烧砂、黏质等, 使土体构型的分类和划分更

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171179, 41171183)和中国科学院 STS 课题(KFJ-EW-ST5-055-5)资助。

* 通讯作者(jlliu@issas.ac.cn)

作者简介: 刘愫倩(1990—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事水环境模拟研究。E-mail: liusuqian1990@sina.com

加细致^[1]。

关于土体构型的分类,叶文华^[1]于 1985 年对华北平原丰产区土壤的土体构型进行了分类,划分出 4 大类共 10 种类型:均质型(砂土、壤土和黏土型)、薄体型(薄层、底漏沙和底障碍层型)、夹层型(砂夹黏、黏夹砂和砂、壤、黏互层型)和上松下紧型。由于华北平原地区土壤在冲积物上发育,质地层次分明,较有代表性,之后李学敏等^[2]根据其与土壤肥力的关系,将土体构型分为以下 4 类:均质型(剖面通体无质地类型差别),蒙金型(上轻下黏,上虚下实),腰砂型(上下黏中间砂)和叠加型(薄的砂、壤、黏层交替叠加)。在其他不同土质地区则有其他分类方式,如典型旱作区三江平原,可划分为以下 6 类:薄土层型、散砂型、下部砂砾型、夹层型、黏鳧型和适体型^[16]。

土体构型将土壤剖面视作一个整体来研究,在实地研究过程中对研究方法会有诸多限制。目前,多采用传统的打土钻或开挖剖面,采样并分析各层土壤质地类型的方法来了解土体的层次组成及其排列组合情况,其缺点是野外工作量大、效率低,且土壤具有较强的空间变异性,破坏性采样会影响土壤原状结构。随着技术的发展和科研要求的提高,更多的新技术被用以探索土体构型。探地雷达(GPR)技术。GPR 法是基于电磁波的原位探测方法,由地球物理领域引入,具有无损、快速探测的优势^[17],已经开始应用于如土壤水分测定^[18]、污染土壤中污染物含量测定^[19]等,但其目前仍存在一些问题^[20],如间接解译层面分布导致不够直观,无法摆脱土体本身性质的干扰,对深部土层的探测无法保证分辨率等。电阻率技术。水文地质中经常使用到的一种电探技术。以多芯电缆连接电极向地下加载电流,通过反馈回的不同电阻率信号诊断不同质地与构造^[21]。电阻率技术基本实现自动/半自动化,采集速度快且效率高,采集数据量大,抗干扰能力强,但会受到温度变化的显著影响。目前此技术正被逐渐应用到土壤水文学和多尺度土壤特性的监测中^[22]。此外,地统计学方法,即采用随机函数来分析不确定现象,通过已知采样点信息对未知点进行空间估计和模拟的方法则弥补了传统方法在空间数据分析上的不足,特别是地理信息系统(GIS)的发展更是极大地推动了空间数据的分析和挖掘^[23]。这也为区域尺度上的土壤构型研究提供了有效手段。

2 土体构型对土壤水分运动的影响机理

土体构型由于土体质地差异引起水分运动差异,目前的研究难点和热点主要集中在土层界面位置的

物理、化学和生物过程的不连续或突变。土体构型对水分运动的影响主要是由于剖面尺度的土体非均质性造成了水流阻滞效应^[24]。其根源在于土体构型中的异质层(textural contrast layer),即在自然和人为的共同作用下土壤中出现的质地差异明显的层次结构^[25],如冲积或沉积成因的砂、黏互层,长期耕作形成的犁底层等。不同土体构型中水分运动的差异正是由于土体中出现异质层,使得质地界面(textural interface)处的土壤孔隙和水力学性质出现明显的不连续性,从而影响整个土体内的水流量和含水量分布^[26]。

关于土体剖面纵向非均质性引起的水流阻滞效应,国内外很多研究者均尝试从水动力学角度进行解释。如 Alfnes 等^[27]指出,水流阻滞的作用机理主要包括两种:含水量较低时的毛细阻滞(capillary barrier)和含水量较高时的水力阻滞(hydraulic barrier)。毛细阻滞是指土壤含水量较低时,水流由持水能力较强的黏质层流向持水能力较弱的砂质层,粗孔隙的砂质土由于不存在有效导水能力,毛管力会阻止水分由细孔隙的黏质土向粗孔隙的砂质土移动,层间毛细水联系发生断裂,造成该土体中黏质土层能持有明显高于均质土持水量的现象^[28-29]。由于其发生在非饱和条件下且是由质地较细土壤流向较粗土壤,与通常意义上理解的“土壤大孔隙的增加能使溶质更快地穿透土体”相反,非常容易被忽视或误读。水力阻滞的作用机理与毛细阻滞相反,指在含水量较高时,黏质土层由于自身导水力低而降低整个土层的导水能力,最终使得该土体中的砂质土层也能够持有明显高于均质土持水量的现象^[30]。

毛细阻滞和水力阻滞的发生与土壤的持水能力(土壤水分特征曲线)和导水能力(非饱和导水率)密切相关^[31]。毛细阻滞会随着层状土壤之间的水势差降低而减弱,当水流方向上的砂质土导水能力达到或超过来水方向的黏质土层时,毛细阻滞彻底消失;且其发生时通常伴随着指流等土壤优势流形态,会加速其消失,同时造成水分在土体中进行不均匀运动,使得传统的活塞流模型不再成立^[32-33]。水力阻滞则会因含水量增加后土层界面间导水能力差异增大而愈加明显。

水流阻滞效应虽发生在某一异质层,但其对整个土体水分运动的影响却是宏观的^[34]。水流方向上土层的实际导水能力在某些条件下要小于来水方向土层的导水能力,会导致整个土体导水能力的减弱,及来水方向土层中水分的滞留和整个土体持水能力的增加^[35]。在田间条件下,土体中的某些土壤层次可能产生水流阻滞效应,从而使整个土体的水分运动发

生变化；且此效应作用机理不尽相同，对水分的影响也十分复杂^[36]，不仅与土壤水力学性质差异有关，还与异质土层在整个土体构型中的埋深、厚度、层数、相邻土层性质等因素有关^[37]。因此，需要在土体构型的相关研究中着重注意异质层的作用。

随着机理性研究的发展和深入，水流阻滞效应已受到了越来越多研究者的重视，研究成果亦逐渐被应用于地质工程防渗^[38-39]、农业生产中控制土面蒸发和改良盐碱土^[9,40]等实际工作中。

3 土体构型对土壤氮素迁移转化的影响机理

3.1 土体构型对溶质态氮素运移的影响

土壤中的氮素运移(对流和弥散过程)与其载体——土壤水分的运动密切相关。氮素随着土壤水分的运动而迁移，且也会在自身浓度梯度的作用下运动。由于土壤水流过程改变，导水性减弱，持水性增强，氮素随之运移，其中以对流形式运移的会减少，以弥散形式运移的会增加^[41]。在改变土壤水分运动的过程中，土体中异质层的作用同样不容忽视。在不同条件下，均有研究表明夹砂或夹黏都可有效地涵养水分，降低氮素运移，提高氮素累积^[12,42]。这是由于异质层中水流阻滞效应的存在，会降低或减缓土壤水的深层渗漏和蒸发，改变土壤水分的分布状况，随之改变溶质态氮素在土体中的分布并减少淋溶损失，阻碍氮素的运移和淋溶，同时深层氮素也难以向上迁移，因此对降低深层土壤和地下水的污染风险有显著效果^[43-44]。

但近年来有关土壤优势流的研究指出，由于土体中存在水分或溶质运移的优势通道(如：根孔、蚯蚓洞等)，会形成指流、漏斗流等形式的优势流，不仅会加速土壤溶质的运移，而且还可能导致溶质迁移至更远的距离，而传统的对流-弥散理论和模型无法很好地解释优势流情况下的溶质运移过程^[45]。目前这一过程正在逐渐得到国内外研究者的关注^[46-47]。

3.2 土体构型对土体中氮素化学和生物行为的影响

土体构型对土壤氮素转化过程的影响还体现在土壤化学和生物环境方面。影响土壤氮素转化的化学和生物作用主要包括微生物同化^[48]、2:1型黏土矿物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的固定^[49]以及苯酚类化合物与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的聚合反应^[50]等。这几类对氮素行为的影响都与土体构型密切相关。土体构型的不同会使土壤化学环境产生差异，影响土壤透气性和含水量分布，使得氧化还原、微生物生存条件出现差异，进而影响硝化/反硝化速率和不同形态氮素的含量以及微生物对施入氮肥的持留能力^[51-52]，最终使不同土体构型中的微生物活性和苯酚类化合物的累积量产生不同。耕作土壤

中微生物对氮肥的固定起重要作用，微生物会优先利用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为氮源，并随着土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低调节自身机制决定优先吸收的氮素形态^[53]。此作用属于生物固持。同时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 还受到2:1型黏土矿物的固定，其主要吸附于黏粒、粉粒中，土壤黏粒含量越高，对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的固持作用也越强^[54]。土壤中黏土矿物固定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的能力受成土母质、土壤质地、黏粒含量、黏土矿物组成等因素的影响，其中黏粒含量通常与氮素含量间存在较显著的正相关关系，土壤质地愈黏重，土壤氮素含量越高^[55]。苯酚类化合物与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的聚合反应可简单描述为土壤中轻质有机物对氮素的吸附，这也与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 自身易被吸附的性质有关，且苯酚对硝化作用会产生一定程度上的抑制，使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化受阻，从而提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤中的持留量^[56]。李梅和张学雷^[57]已通过研究证实，通体砂构型和上壤下砂构型的保氮能力较其他构型要差。

3.3 土体构型对作物生长发育的影响

不同土层的透气性和紧实度存在差异，因此土体构型会对植物根系的生长发育造成直接的影响。不同理化性质的土层组合方式发生变化，会导致土体中的植物根系分布发生变化^[58]。通常认为，土体过于紧实、土壤通气状况较差，根系生长发育会受到抑制，同化物用于冠部较多，使得根冠比降低；土体若较为松散，则作物根系延伸阻力小，更易追逐水源，促进根系生长，根冠比增大^[59]。值得注意的是，土体构型对作物根系产生的这种影响最终仍会体现到土体中的水氮分布上。植物根系的生长对土壤水分和养分具有趋向性。异质层的水流阻滞效应会提高土壤水分、养分库容并影响其空间分布，从而改变作物对土壤剖面中不同层次水养的吸收量^[60]。作物根系在异质层的吸收作用通常会强于其他土层，导致该层根系发达，对水氮的吸收也更迫切，最终导致土体中不同层次间根系生长状况的显著差异。

4 土体构型的农学效应评估及其改良措施

土体构型优劣的评估标准视土地利用目的不同而有所区别。从农业生产的角度来看，好的土体构型一般表现为土层深厚、土壤质地适中、土壤保肥保水和供肥供水能力较强、排水和渗透条件好、地面平坦、无侵蚀无盐碱威胁、利于机耕等^[1]。严昶升等^[61]研究了我国主要的几种耕作土壤土体构型，结果表明，良好的旱地土体构型一般要求上部耕层较为疏松深厚，同时下部存在厚度适宜、质地紧实的保水保肥层；良好的水田土体构型则应有利于保持相对稳定的水层，

底土又能爽气供水。之后有研究者对土体构型优劣作了更细致的分析和评价,大致整理出不同土体构型在潮土保墒能力上的差异:重壤土>上壤下黏>砂壤土>上黏下砂>砂土^[62]。檀满枝等^[63]将河南封丘县典型潮土分为 8 种土体构型,其中砂-砂-砂型小麦生产力水平最低,壤-黏-壤、壤-黏-黏构型是肥力条件较好的土壤,砂-壤-壤、壤-壤-壤、壤-壤-黏构型是肥力条件最好的土壤,进一步细化了良好构型和不良构型的种类。

针对不利于水肥保持的土体构型,可采用外部手段对其进行改良,如添加有机肥、增施绿肥、浅层掺黏、浅层翻压等^[64]。有研究表明,向土壤中施入粉碎秸秆能显著增加土壤团聚体评价指标,如:大团聚体含量($R_{0.25}$)、团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)等,使土壤结构的稳定性显著提高;不同处理秸秆施入土壤后,均能逐步改善土壤孔隙的均匀性和连通性,效果较单施无机土壤改良剂措施更优^[65]。近年来,韩晓增等^[66]在东北黑土区开展了肥沃耕层构建研究,结合大型机械,通过深松、秸秆深埋和有机肥相结合的方式快速改善亚耕层(犁底层)的土壤水物理性质。结果表明,向 20 ~ 35 cm 土层(犁底层)施入秸秆和有机肥可明显改善其土壤组成,减小土壤体积质量,提高土壤孔隙度,增加土壤的透气性和疏松程度。同时,肥沃耕层的构建也增加了土壤的饱和导水率和透水性,减少了地表径流损失,增加了大气降水的入渗。若能解决技术上的难点,实现这一课题的大面积推广,无疑将为我国农田地力提升的未来发展提供坚实基础。

5 结语和展望

本文对土体构型及其对土壤水氮储存运移影响方面的文献报道作了较全面的梳理,同时进一步探讨了土体构型的农学效应及其改良措施。结果表明,土体构型是决定农田生产力的重要物理基础,其对土壤水氮储存能力和运移过程的影响主要源于发育在土体中的异质层:构型中异质土层的土壤性状突变使层次界面处发生水流阻滞效应(其中含毛细阻滞和水力阻滞),对土壤水分运动和再分布产生强烈影响,同时界面处的物理、化学、生物环境的突变也会对氮素的分布、迁移和转化产生重要影响,最终使整个土体中不同土层间的水氮储运状况产生差异。

在该领域未来的研究中,还应着重注意以下几个方面:

1) 研究尺度的进一步拓展:首先应将土体全剖面作为一个整体来开展研究,而非仅仅局限于耕层

和亚耕层;其次,应进一步引入新的数据挖掘、空间模拟技术,以便更好地实现由点尺度到区域尺度的拓展。

2) 研究技术手段的进一步更新:诸如 GPR 法、电阻率法等无损探测技术业已显现出较好的应用前景,应进一步探索其在农业土壤领域中的适用性,为实现大面积快速监测提供技术支持。

3) 机理研究的进一步深化:土体构型对土体中各种物理、化学、生物过程的影响主要体现在土壤层次界面或异质层处的突变,耦合过程的影响因素、发生机理、演变规律涉及到农业、环境、生态学等诸多学科领域,应是今后相关研究的热点和难点问题。

4) 土体构型改良技术的推广应用:土体构型是由长期的自然、人为作用形成的,对不利的构型进行改良应考虑到投入产出比,特别是大面积推广应用必须研制或引入新的大型机械,其工作模式是否适应我国国情等都需要考虑。

参考文献:

- [1] 叶文华. 华北平原农田土体构型与作物生长关系的研究[J]. 地理学报, 1985, 40(1): 37-49
- [2] 李学敏, 翟玉柱, 李雅静, 等. 土体构型与土壤肥力关系的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 975-977
- [3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783
- [4] Zettl J D, Barbour S L, Huang M, et al. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 133-147
- [5] Ityel E, Lazarovitch N, Silberbush M, et al. An artificial capillary barrier to improve root zone conditions for horticultural crops: physical effects on water content[J]. Irrigation Science, 2011, 29(2): 171-180
- [6] 武继承, 杨永辉, 刘东亮, 等. 砂质潮土不同土体构型对花生生长和土壤养分的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(10): 76-80
- [7] Khire M V. Capillary barrier: Design variables and water balance[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(8): 695-708
- [8] 赵霞, 黄瑞冬, 唐保军, 等. 潮土区不同土体构型对夏玉米生长与产量的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 538-542
- [9] 史文娟, 沈冰, 汪志荣. 层状土壤水盐动态研究与分析[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 250-254
- [10] 郑险峰, 李紫燕, 李世清. 农田浅层土壤氮素空间分布研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 370-372
- [11] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 23-26
- [12] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44-51

- [13] Li J S, Ji H Y, Li B, et al. Wetting patterns and nitrate distributions in layered-textural soils under drip irrigation[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(8): 970–980
- [14] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 70–72
- [15] 严昶升, 崔勇, 于德清. 以土壤质地与空隙组成为指标的土体构造分类命名方法[J]. *土壤通报*, 1985, (6): 260–263
- [16] 颜春起. 三江平原土体构型与旱涝关系的研究[J]. *土壤学报*, 1984, 21(1): 70–78
- [17] 陈义群, 肖柏勋. 论探地雷达现状与发展[J]. *工程地球物理学报*, 2005, 2(2): 149–155
- [18] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 基于探地雷达的土壤水分测定方法研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 1 039–1 044
- [19] 侯晓冬, 郭秀军, 贾永刚, 等. 基于探地雷达回波信号获取污染土壤中污染物含量的研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(3): 962–968
- [20] 谢昭晖, 李金铭. 我国探地雷达的应用现状及展望[J]. *工程勘察*, 2007, 1(11): 71–75
- [21] 李银真. 高密度电阻率法物探技术及其应用研究[D]. 辽宁阜新: 辽宁工程技术大学, 2007
- [22] 马东豪, 张佳宝, 吴忠东, 等. 电阻率成像法在土壤水文学研究中的应用及进展[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 439–447
- [23] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: I. The semivariogram and punctual kriging[J]. *Journal of Soil Science*, 1980, 31(1): 315–331
- [24] Yeh T C, Harvey D J. Effective unsaturated hydraulic conductivity of layered sands[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(6): 1271–1279
- [25] Li X P, Chang S X, Salifu K F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review[J]. *Environmental Reviews*, 2014, 22(1): 41–50
- [26] Si B, Dyck M, Parkin G. Flow and transport in layered soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91 (2): 127–132
- [27] Alfnes E, Kinzelbach W, Aagaard P. Investigation of hydrogeologic processes in a dipping layer structure: I. The flow barrier effect[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 69(3–4): 157–172
- [28] Aulakh M S, Singh B. Nitrogen losses and fertilizer N use efficiency in irrigated porous soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1996, 47(3): 197–212
- [29] Aubertin M, Cifuentes E, Apithy S A, et al. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(10): 1 146–1 164
- [30] Sato K, Masunaga T, Wakatsuki T. Water movement characteristics in a multi-soil-layering system[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2005, 51(1): 75–82
- [31] Hillel D, Talpaz H. Simulation of soil water dynamics in layered soils[J]. *Soil Science*, 1977, 123(1): 54–62
- [32] Kung K. Preferential flow in a sandy vadose zone: 2. Mechanism and implications[J]. *Geoderma*, 1990, 46(1): 59–71
- [33] Javaux M, Vanclooster M. In situ long-term chloride transport through a layered, nonsaturated subsoil: 1. Data set, interpolation methodology, and results[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(4): 1 322–1 330
- [34] Huang M, Zettl J D, Barbour S L, et al. The impact of soil moisture availability on forest growth indices for variably layered coarse-textured soils[J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(2): 214–227
- [35] Unger P W. Soil profile gravel layers: I. effect on water storage, distribution, and evaporation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, 35(4): 631
- [36] Yang H, Rahardjo H, Leong E C. Behavior of unsaturated layered soil columns during infiltration[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, 11(4): 329–337
- [37] Shokri N, Lehmann P, Or D. Evaporation from layered porous media[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(B6): 258–273
- [38] Mccartney J S, Zornberg J G. Effects of infiltration and evaporation on geosynthetic capillary barrier performance[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47(11): 1 201–1 213
- [39] Stormont J C, Anderson C E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer[J]. *American Society of Civil Engineers*, 2014, 125(8): 641–648
- [40] Mccartney J S, Allen J M. Use of geosynthetic capillary barriers for increasing water storage capacity of soils in agriculture applications[J]. *Gri Conference*, 2008
- [41] 吕殿青. 土壤水盐运移试验研究与数学模拟[D]. 陕西西安: 西安理工大学, 2000
- [42] Johnsson H, Bergstrom L, Jansson P E, et al. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1987, 18(4): 333–356
- [43] Badv K, Aa M. Chloride transport in layered soil systems with hydraulic trap effect[J]. *Environmental Technology*, 2005, 26(8): 885–897
- [44] Javaux M, Vanclooster M. In situ long-term chloride transport through a layered, nonsaturated subsoil: 2. Effect of layering on solute transport processes[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(4): 1 331–1 339
- [45] 徐绍辉, 张佳宝. 土壤中优势流的几个基本问题研究[J]. *水土保持学报*, 1999, 5(6): 27–30
- [46] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1): 179–204
- [47] 彭海英, 李小雁, 崔步礼, 等. 土壤优势流研究方法综述[J]. *干旱气象*, 2011, 29(2): 137–143
- [48] Johnson D W, Cheng W, Burke I C. Biotic and abiotic nitrogen retention in a variety of forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1 503–1 514

- [49] Mary B, Recous S, Darwis D, et al. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil[J]. *Plant and Soil*, 1996, 181(1): 71–82
- [50] Frey S D, Elliott E T, Paustian K, et al. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(5): 689–698
- [51] 李亚娟, 杨俞娟, 张友润, 等. 水分状况与供氮水平对土壤可溶性氮素形态变化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1 153–1 160
- [52] Jahangir M M R, Khalil M I, Johnston P, et al. Denitrification potential in subsoils: A mechanism to reduce nitrate leaching to groundwater[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 147(2): 13–23
- [53] Kelley K R, Stevenson F J. Effects of carbon source on immobilization and chemical distribution of fertilizer nitrogen in soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(4): 946–951
- [54] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1 580–1 590
- [55] Rice C W, Tiedje J M. Regulation of nitrate assimilation by ammonium in soils and in isolated soil microorganisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21(5): 597–602
- [56] Accoe F, Boeckx P, Videla X, et al. Estimation of gross nitrogen transformations and nitrogen retention in grassland soils using FLUAZ[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1 967–1 976
- [57] 李梅, 张学雷. 不同土体构型的土壤肥力评价及与容重关系分析[J]. *土壤通报*, 2011, 42(6): 1 420–1 427
- [58] Bengough A G, Young I M. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances[J]. *Plant and Soil*, 1993, 149(1): 129–139
- [59] Dracup M, Gregory R B. Constraints to root growth of wheat and lupin crops in duplex soils[J]. *Animal Production Science*, 1992, 32(7): 947–961
- [60] Gleeson S K, Good R E. Root growth response to water and nutrients in the New Jersey Pinelands[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 40(1): 167–172
- [61] 严昶升, 崔勇, 于德清. 我国几种主要耕作土壤的土体构造[J]. *河北农业大学学报*, 1989, 12(1): 108–115
- [62] 皇甫湘荣, 宝德俊, 张鸿程, 等. 土体构型对潮土持水能力和水分利用的影响[J]. *水土保持研究*, 1996, 3(3): 104–107
- [63] 檀满枝, 李开丽, 史学正, 等. 华北平原土壤剖面质地构型对小麦产量的影响研究[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 913–919
- [64] 徐秀艳. 不同质地构型土壤的利用和改良[J]. *现代农村科技*, 1995(2): 25
- [65] 王珍. 秸秆不同还田方式对土壤水分特性及土壤结构的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010
- [66] 韩晓增, 邹文秀, 王凤仙, 等. 黑土肥沃耕层构建效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2996–3002

Effects of Soil Profile Configuration on Soil Water and Nitrogen Storage and Transportation: A Review

LIU Suqian^{1,2}, XU Shaohui¹, LI Xiaopeng², YAN Yifan², ZHAO Yongchao², LIU Jianli^{2*}

(1 *Department of Environmental Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;*

2 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)*

Abstract: Soil configuration is the arrangement and combination of differently textured soil layers in a profile. This configuration has significant effects on soil water/solute transport and crop growth, and therefore is of fundamental significance in sustainable agriculture and environmental protection. This paper summarized the research progresses and latest achievements in this field, especially the effects of soil configuration on water and nitrogen storage and transport and their agronomic responses. The prospects of the future research on this topic were also presented.

Key words: Soil configuration; Water movement; Nitrogen storage and transport; Amelioration techniques