

东南湿润区坡面土壤水文过程研究进展与展望

廖凯华¹, 吕立刚²

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023)

摘要:东南湿润区是我国生态环境问题最为突出的区域之一,水体的富营养化是困扰该区域经济和社会发展的主要问题。尤其近些年来,在政府鼓励和市场推动双重作用下,丘陵山区的开发力度逐步加强,越来越多的原生态竹林被开发为经济型用地(如茶园)。但该土地利用方式的转变在带来经济效益的同时,也改变了下垫面土壤孔隙结构和土壤水文过程,从而极大地影响着营养盐随土壤水分的迁移和转化。在国家自然科学基金青年科学基金项目“太湖流域丘陵区坡面土壤水文过程物理机制及模拟研究”的资助下,在以下3个方面取得了重要进展:①不同土地利用坡面土壤水分时空变化与影响因素;②坡面水文过程与水量平衡;③坡面土壤水文过程影响机制。目前对太湖流域丘陵区土壤水文过程研究虽取得一些进展,但其影响机制仍不十分明确,有待进一步深入的探讨。上述成果的取得以及未来的持续探索,对于太湖水体富营养化与流域面源农业面源污染控制具有重要的环境意义,进而为推动我国流域生态文明建设提供理论支持。

关键词:太湖流域;坡面尺度;土壤水文过程;数值模拟;影响因素

1 引言

地球关键带(Earth's Critical Zone)处于地表岩石圈、水圈、土壤圈和生物圈的交互地带(图1a),地球关键带土壤水文过程及其与环境因子之间的交互关系是近年来国内外关注的新兴交叉研究方向(Lin et al, 2005; Pachepsky et al, 2006; Vepraskas et al, 2009)。研究土壤水文过程对探讨营养盐在地表不同界面之间的输移和交换至关重要,这是因为土壤水文过程是营养盐迁移的主要驱动力,同时土壤水文过程影响土壤的理化性质,决定着土壤中水分和营养盐的有效性(Zhu et al, 2012)。因此,土壤水文过程决定了土壤中营养盐迁移和循环,对于控制水体富营养化和农业面源污染具有重要的环境意义。

东南湿润区是我国生态环境问题最为突出的区域之一,水体的富营养化是该区域当前面临的主要经济和社会发展问题之一(图1b)。相关研究发

现,太湖流域土地开发利用是该区域的水体富营养化诱因之一(李恒鹏等, 2004)。近年来,在太湖流域丘陵区(面积 6151.23 km², 占流域总面积的 16.67%),受政府鼓励和市场推动的双重作用,越来越多的生态型用地(竹林)向经济型用地(茶园)转变,这种转变在带来巨大经济效益的同时,地表关键带土壤水文过程也发生着剧烈的变化(Vepraskas et al, 2009; Liao, Lai, Liu et al, 2016),进而深刻影响着营养盐的输移循环,已经引发了河湖水质下降等一系列生态环境问题。比如,韩莹等(2012)研究发现太湖丘陵区茶园对氮磷的利用效率远低于竹林和水田,该区域农业综合开发对流域水环境已造成严重的负面影响;杨超杰等(2017)同样认为,太湖丘陵河谷区水质主要受茶园种植等农业活动导致的面源污染的影响。可见,太湖流域丘陵区的生态环境问题应引起高度重视。

坡面是丘陵区的基本空间单元,研究坡面土壤

收稿日期:2018-01-25;修订日期:2018-04-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(41301234, 41771107);国土资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2017CZ-EPK03) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41301234, No. 41771107; Open Foundation of Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resource, No. 2017CZEPK03]。

作者简介:廖凯华(1984-),男,江西吉安人,副研究员,主要从事土壤水文过程与营养盐输移耦合研究, E-mail: khliiao@niglas.ac.cn。

引用格式:廖凯华, 吕立刚. 2018. 东南湿润区坡面土壤水文过程研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(4): 476-484. [Liao K H, Lv L G. 2018. Advances in research of hillslope soil hydrological processes in the humid region of Southeast China[J]. Progress in Geography, 37(4): 476-484.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.04.003

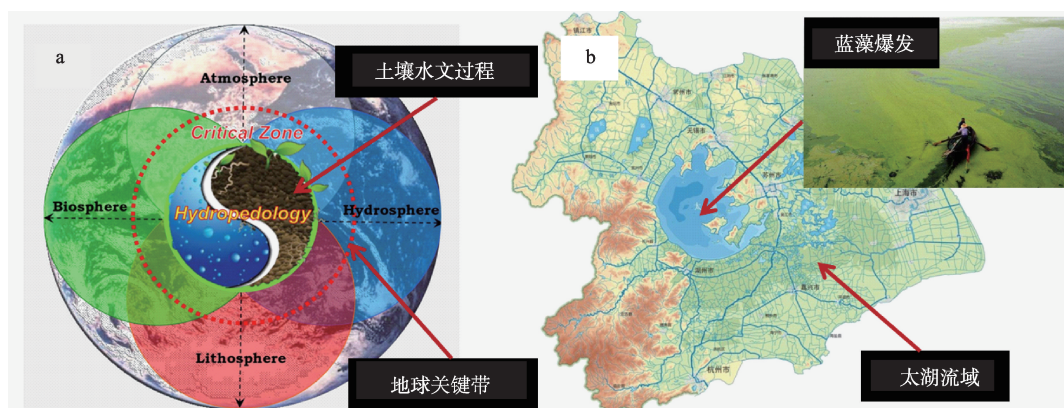


图1 (a)地球关键带土壤水文过程和(b)太湖流域蓝藻爆发

Fig.1 (a) Soil hydrological processes in Earth's Critical Zone and (b) cyanobacterial blooms of the Taihu Lake

水文过程可为深入理解太湖流域丘陵区营养盐输移循环奠定重要基础。目前,坡面尺度土壤水文过程研究主要通过室内和野外试验观测、数理统计分析、数值模拟等手段实现(Lan et al, 2013)。近年来,随着观测手段的进步和计算机技术的快速发展,很多学者在野外实际流域开展了坡面水文循环的精细观测与模拟研究,如德国 Weiherbach 实验流域 (Bárdossy et al, 1998)、新西兰 Maimai 实验流域 (Weiler et al, 2007)、美国 Andrew 森林流域 (McGuire et al, 2007)、Panola 实验流域 (Freer et al, 2002)、Hecla Greens Creek 矿区山坡 (Hopp et al, 2009)、Shale Hills 实验流域 (Shi et al, 2015)等。在国内,以傅伯杰为代表的科研人员系统地分析了黄

土丘陵区坡面土壤水文过程,并开发了相应的数学模型(Fu et al, 2001; Qiu et al, 2010)。然而,目前有关太湖流域丘陵区坡面土壤水文过程试验观测与模拟研究相对较少,主要是由于该地区土壤砾石含量高(>40%)、渗透能力强且土层很薄(<1 m),难以形成地表径流,坡面产流主要以壤中流形式为主,而壤中流野外观测比较困难,严重制约了对该地区土壤水文循环和营养盐输移过程的机理解析。

基于太湖流域丘陵坡地开发和土地利用方式改变的现状,选取两个相邻但用地类型不同的坡面,如竹林和茶园,分别代表生态型用地和经济型用地(图2)。在国家自然科学基金青年科学基金项目“太湖流域丘陵区坡面土壤水文过程物理机制及

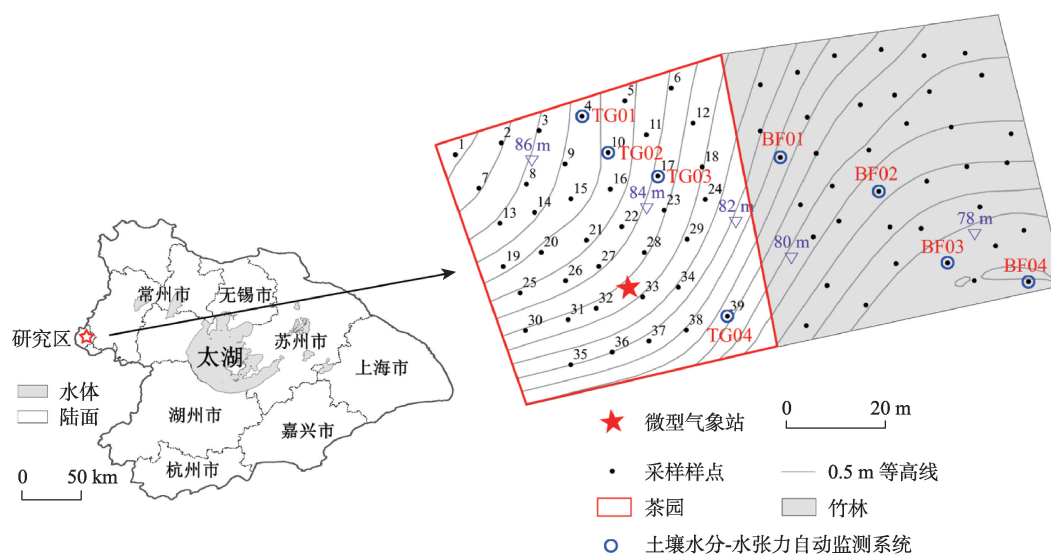


图2 研究区位置和坡面土壤水文观测布点

Fig.2 Location of the study area and hillslope soil hydrologic observation stations

模拟研究(项目批准号:41301234;起止年月:2014年1月–2016年12月)”的资助下,重点开展了3个方面的研究,包括:①不同土地利用坡面土壤水分时空变化与影响因素;②坡面水文过程与水量平衡;③坡面土壤水文过程影响机制。上述研究对区域水土资源可持续利用、农业水肥管理以及水体富营养化防治都有十分重要的科学与实践意义。

2 数据与方法

2.1 基础数据获取

研究区具体位于南京高淳区东坝镇北部青山茶厂内(31°21'N, 119°03'E),选取了茶园(*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)(15a生)和竹林地(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)(30a生毛竹林)两个土地利用坡面(图2),土壤类型以薄层粗骨土为主,土壤质地主要为粉质壤土(Liao, Lai, Lv et al, 2016)。在坡面上以8 m为取样间隔,共设置77个监测样点,其中茶园39个,竹林38个。测定的数据包括土壤数据与地形数据:①土壤体积含水量、土壤水张力、气象因子(降水量、相对湿度、温度、太阳辐射、风速和风向)(图3)、土壤砾石含量、质地、有机

质含量、总氮(TN)、总磷(TP)和总钾(TK);②根据南京市国土资源局提供的1:1000地形图,生成1 m分辨率的坡面数字高程模型(DEM),利用ArcGIS提取高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率和地形湿度指数。

2.2 坡面土壤水分时空变异及影响因素分析方法

采用平均值和变异系数(CV)等经典统计参数描述典型坡面土壤水分变化的统计特征。CV值可反映土壤水分变异程度, $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, CV 在10%~100%之间为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 为强变异性。此外,还采用地统计学方法研究坡面土壤水分时空变异特征,该方法以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具,利用原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行无偏估值的一种方法。变异函数的拟合模型包括球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型等,可根据最大决定系数(R^2)和最小残差平方和(RSS)来选取最优拟合模型,从而得到4个重要的参数,即:基台值 $C+C_0$ (sill)、块金值 C_0 (nugget)、空间异质比($C_0/C+C_0$)和变程 A_0 (range)(Cambardella et al, 1994)。坡面土壤水分影响因素则采用相关性分析和多元逐步回归方法进行定量识别。

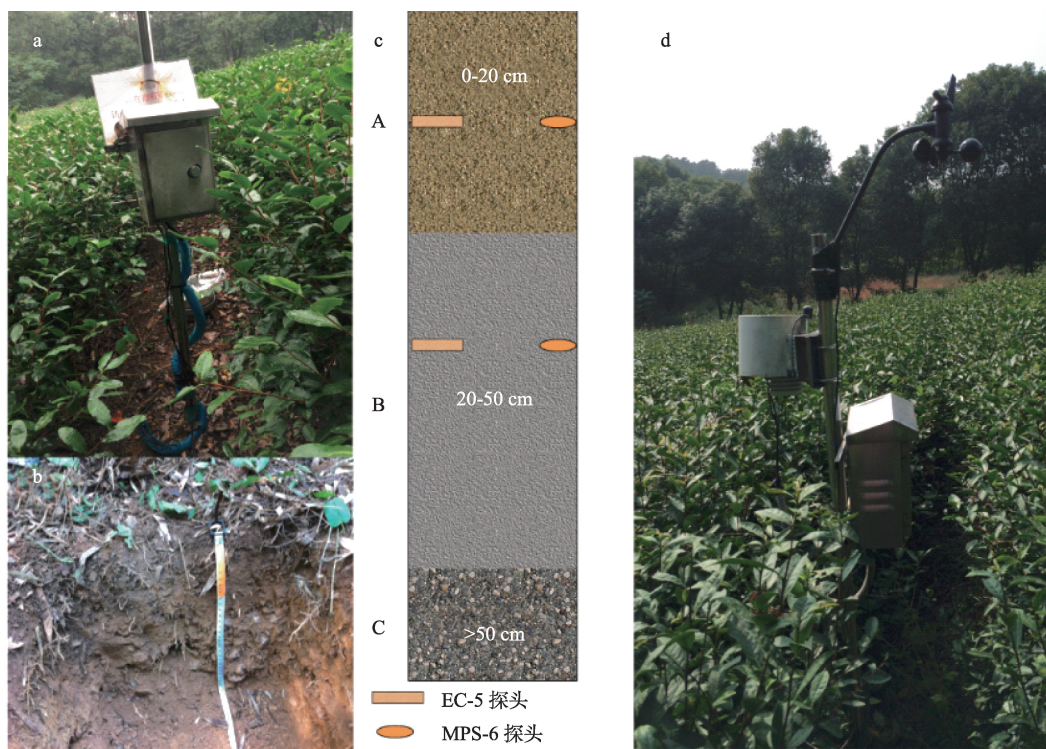


图3 自动监测系统、土壤剖面情况和微型气象站

Fig.3 Automatic monitoring system, soil profile condition, and mini weather station

2.3 坡面土壤水文过程模型

本研究采用 HYDRUS-2D 模型(Šimůnek et al, 1999)来模拟坡面土壤水文过程,该模型采用二维 Richards 方程来描述坡面土壤水分运动过程。描述土壤水力学特性的参数包括土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 和非饱和导水率 K ,采用广泛应用的 van Genuchten-Mualem 模型(Mualem, 1976; van Genuchten, 1980)进行描述。

假设初始土壤含水量在坡面上均匀分布,通过一定时期的模型“预热”,逐渐减小初始条件的影响。模型上边界设置为大气边界,坡顶位于分水岭处且与外界无水量交换,设为零通量边界,坡脚边界设置为自由排水。潜在蒸散量 ET_p 采用 Hargreaves 公式计算,并根据叶面积指数(LAI)划分为潜在蒸发率(E_p)和潜在蒸腾率(T_p)(Ritchie, 1972),茶园和竹林的消光系数均设为 0.52(Liao et al, 2014; Liao, Lv et al, 2016)。此外,根系吸水过程采用 van Genuchten 宏观模型(van Genuchten, 1987)进行描述。

2.4 坡面壤中流通量多情景模拟方法

基于坡面土壤水文过程模型,设置了不同情境模式(降雨模式、土壤质地、坡度)预测分析坡面壤中流通量及其控制机制。共设置 216 种不同条件组合的情境:①2 种用地类型:茶园和竹林;②每种用地类型下设置 3 种坡度条件:坡度平缓(5%),原有模型坡度不变(茶园:8.12%;竹林:10.80%),中等斜坡(20%);③每个坡度条件下设置 6 种土壤质地类型:壤砂土、壤土、粉土、粉壤土、黏壤土和黏土,利用 HYDRUS 模型内嵌的 ROSETTA 神经网络模块预测得到各质地类型土壤的水力学参数(如 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 和 K_s , l 统一设为 0.5);④每种土壤质地条件下设置 6 种降雨模式,从情境 I 至情境 VI,降雨频率逐渐减小,降雨强度逐渐增加。

3 坡面土壤水文过程及其影响机制

3.1 坡面土壤水分时空变异及影响因素

在观测期内,由于受降雨和气温变化的影响,茶园和竹林不同深度土壤水分的平均值和变异系数随时间变化明显,其中竹林土壤水分明显高于茶园,这可能与林地根系发达、涵养水分强有关。同时研究还发现茶园和竹林土壤含水量平均值与前

期降雨量(前 7 天累计降雨量)之间均存在明显的正相关关系(Liao, Zhou et al, 2017)。茶园和竹林均属于中等的变异性,这与刘宏伟等(2016)的研究基本一致,他们发现在太湖流域湿润地区土壤水分呈中等或者中等偏弱变异性。茶园土壤水分的变异性高于竹林,这可能是因为茶园的管理措施对地表土壤的扰动强,导致土壤水分破碎化程度较高,而竹林为天然林地,人为的干扰小,因而土壤水分的空间连续性较好(杜志勇等, 2007)。

通过对茶园和竹林土壤水分进行地统计分析,发现竹林的块金值小于茶园,说明竹林土壤水分空间分布的随机性比茶园弱(Liao et al, 2017a)。竹林和茶园土壤水分的变程之间无显著差异,而竹林土壤水分的空间异质比总体要小于茶园,说明竹林土壤水分具有更强的空间相关性,这与基于变异系数的统计特征分析结论一致。同时,利用 Spearman 相关性分析对不同用地类型土壤水分空间变异影响因素进行研究,发现坡面土壤水分空间变化主要受土地利用、土壤性质和地形特征等环境因子的共同作用,与以往的研究结论相一致(Grayson et al, 1997; Western et al, 2004; Williams et al, 2009)。通过分析不同用地类型坡面土壤水分时空变异与影响因素,对于太湖流域水土资源可持续利用和农业水肥管理具有较强的现实意义。

3.2 坡面土壤水文过程与水量平衡分析

基于 HYDRUS-2D 模型,对 2013 年 1 月 1 日至 2014 年 8 月 23 日共计 600 天的茶园和林地坡面土壤水文过程进行模拟,发现模型对土壤水分模拟的纳什效率系数(NSE)均高于 0.6,取得了较好的模拟效果(Liao, Lv et al, 2016; Liao et al, 2017b)。同时研究还发现,与下层(30 cm 深度)相比,表层(10 cm 深度)土壤水分的模拟精度较高,这可能是由于下层(30 cm 深度)土壤水分容易受到大孔隙流和指流的影响,导致模拟效果较差。验证期茶园和林地坡面水量平衡模拟结果表明,坡面水分来源主要为降雨,消耗于蒸散发,坡面径流形式为壤中流,无地表径流产生,这可能与试验区坡面砾石含量较高(>40%),使得土壤渗透性好,从而促进壤中流的产生有关(王小燕等, 2012)。段剑等(2017)通过对江西红壤湿润区坡地壤中流的研究时也发现,在自然降雨条件下壤中流输出量显著高于地表径流,成为降雨径流的主要输出形式。

研究还表明,根系吸水在春季和夏季表现最为强烈,并在降水事件后,出现明显增强的趋势。此外,竹林根系吸水量显著大于茶园。这可能是由于竹林根系分布较深,根量也较多,促进了根系吸水过程。然而,在冬季(12月至次年2月),竹林的根系吸水略小于茶园,可能与竹林在冬季处于非生长季有关(陈红等, 2013)。茶园土壤蒸发量略大于竹林,可能与茶园叶面积指数相对较小,受太阳直射影响导致土壤蒸发强烈有关;而竹林叶面积指数较大,对太阳辐射具有一定的削减作用,使得土壤蒸发强度较弱。此外,还对茶园和林地坡面壤中流过程与降水关系进行了研究,发现一般在降雨后1~2天会发生明显的壤中流过程,且随降水量的增加有逐渐增多的趋势。谢颂华等(2015)对自然降雨期红壤湿润区坡地壤中流产流过程进行分析,也发现壤中流流量与降水量呈极显著的正相关关系。总体来看,茶园的壤中流流量明显大于竹林,这也从侧面反映竹林土壤的涵养水源能力更强,而茶园土壤对水分涵养和利用能力较低,这可能与茶园耕作措施(行间沟)使得土壤孔隙度增大(林绍霞等, 2012),进而提高了土壤的透水性能有关。

茶园和竹林壤中流的产生存在明显的前期坡面平均含水量阈值,分别为0.18和0.31 cm^3/cm^3 ,壤中流随着前期平均含水量的增加而增加(图4),这与以往的研究结论类似。比如,Penna等(2011)分析了土壤含水量对坡面径流产生的影响,发现当土壤较为干旱时的壤中流流量较小,但当前期土壤含水量超过0.45 cm^3/cm^3 时壤中流流量显著增加;Zhao等(2015)则发现该阈值约为0.30 cm^3/cm^3 。不同研究得到的阈值有所差异,可能与研究区地形、土壤类型、土地利用和气候条件的不同有关,而该阈值也

是面源污染物坡面迁移的重要控制因子。通过分析不同用地类型坡面土壤水文过程与水量平衡,对于探讨土地利用剧烈变化背景下的太湖流域生态环境保护措施具有重要的科学意义。

3.3 坡面壤中流与环境因子之间的关系

基于多情景(土地利用、降雨模式、土壤质地、坡度)模拟分析,进一步探讨了坡面壤中流与环境因子之间的关系(图5)。从降雨情景来看,壤中流量从情景I到情景VI逐渐增加。陈晓安等(2017)通过分析雨强对红壤湿润区坡耕地壤中流的影响,也发现壤中流径流强度随雨强增大而增加,且不同雨强下壤中流量峰值相近。在相同的降雨情景下,不同土壤质地条件下产生的壤中流也有所不同,其中壤砂土壤中流量大于其他质地类型,可能与其较高的饱和导水率有关。对于不同的坡度情景,随着坡度的增加壤中流也显著增加,是由于坡度越大水分受重力影响越大、下渗能力越强(Lan et al, 2013; 侯旭蕾等, 2013)。在不同情景条件下,茶园坡面产生的壤中流(161.80~783.68 mm)均要远大于竹林(118.61~605.89 mm)。Schume等(2003)的研究也认为,土地利用方式和植被覆盖改变了水分循环过程各要素的水量分配,比如竹林能提高冠层截留、增加蒸散量等。

基于上述分析,降雨对茶园和竹林坡面壤中流均具有实质性的影响。历时短、强度大的降雨能显著增加壤中流,这与Wanke等(2008)的研究结论一致。在观测期内,每当强降雨事件过后,壤中流迅速增加并到达峰值。可以推断,未来的极端降雨事件将会显著增加坡面的壤中流(Brolsma et al, 2010),而以往研究表明,壤中流的产生总是伴随着高浓度氮磷流失(Pionke et al, 1988; Zhu et al,

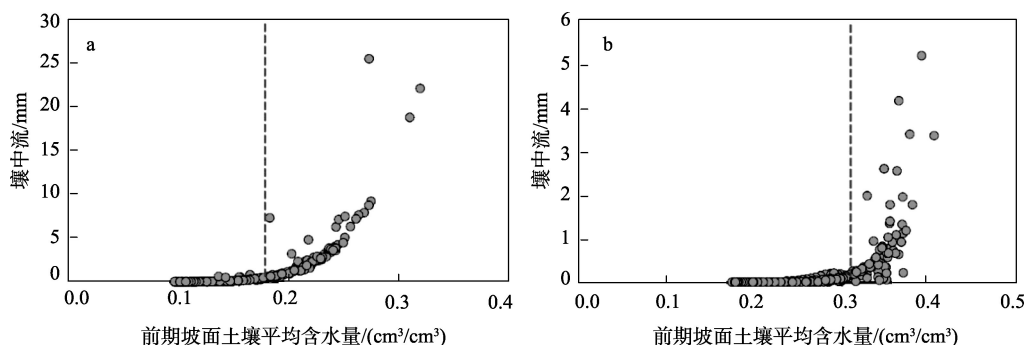
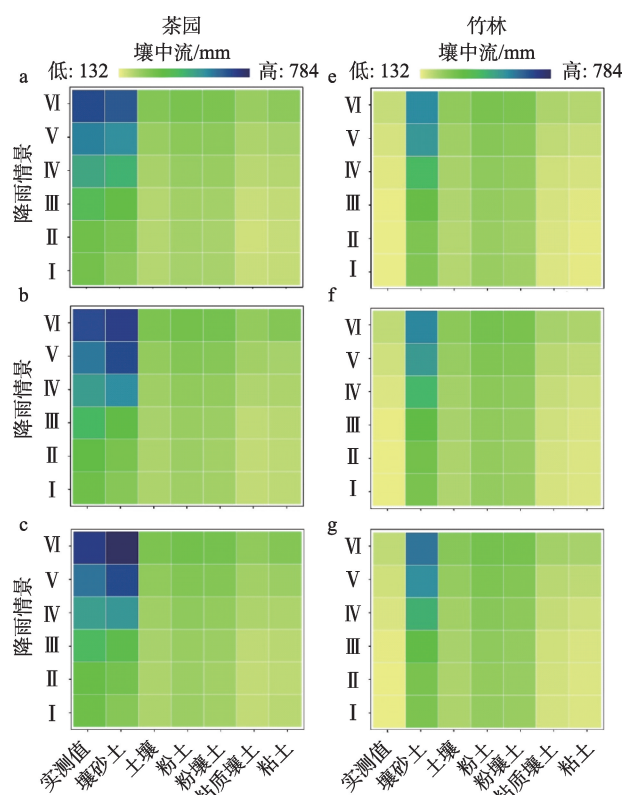


图4 (a)茶园和(b)竹林坡面壤中流与前期土壤平均含水量的关系

Fig.4 Correlations between subsurface flow and antecedent mean soil moisture content on tea garden and bamboo forest hillslopes



茶园坡度情景: (a) 坡度平缓; (b) 原有模型坡度; (c) 中等斜坡
竹林坡度情景: (e) 坡度平缓; (f) 原有模型坡度; (g) 中等斜坡

图5 基于多情景模拟的坡面壤中流与环境因子之间的关系
Fig.5 Correlations between hillslope subsurface flow and environmental factors based on simulations under different scenarios

2011)。常龙飞等(2012)研究发现巢湖典型低山丘陵区坡面营养盐随壤中流流失非常显著,且氮素流失主要以溶解态为主,而磷素主要以有机溶解态形式流失。因此,未来极端降雨事件可能会增加营养盐流失风险,进而加剧太湖水体富营养化和流域农业面源污染。对于太湖流域丘陵坡地的开发利用,需要综合考虑坡面土地利用类型、坡度以及土壤质地等条件。比如,茶园坡面产生的壤中流要远大于竹林,同时其前期坡面平均含水量阈值要小于竹林,表明在相同土壤水分条件下,茶园坡面更易产生壤中流,进而增加氮磷等营养盐流失的风险,因此需合理控制茶园扩张规模,适当实施保护性耕作方式,提高坡面水分利用效率,同时应严格限制粗质地土壤和较大坡度的丘陵区坡面开发成茶园。此外,在对坡面土地利用进行规划设计时,可分段规划设计不同土地利用方式,优化配置坡面土地利用组合模式,削弱坡面壤中流的产流量,尽量降低因土地利用方式转变所引发的营养盐随壤中流流

失的风险,实现坡地的可持续利用。

4 研究展望

湖泊流域控源减负是国家“十三五”重点攻关目标,湖泊流域资源环境关系到老百姓切身利益,关系到全面小康和现代化建设进程。东南湿润区土地利用变化剧烈改变了土壤水文过程,进而深刻影响着氮磷等营养元素的迁移和转化,导致了流域农业面源污染问题。目前流域和坡面土壤水文过程与影响机制研究虽已取得诸多成果,但仍有以下几个方面的问题需进一步研究:

(1) 流域尺度土壤水文过程及其影响机制。当前流域土壤水文过程的相关研究多集中在中小尺度,如平原区农田尺度和丘陵区坡面尺度,缺乏对全流域土壤水文过程的机理认识。由于土壤水文过程尺度效应的存在,不同空间尺度的土壤水文效应、机理和影响因素存在显著差异,亟需在以往研究的基础上,结合多要素土壤水文综合观测、数值模拟、3S技术和数理统计分析等手段,实现土壤水文过程研究的尺度提升和机理过程分析。

(2) 土壤水文过程与营养盐输移耦合机制。在土壤水文过程研究的基础上,开展坡面壤中流与坡面流相互转化过程及机制研究,并进一步分析土壤氮磷等营养盐输移循环过程。以往土壤水文过程与营养盐输移研究是相互割裂的,各自为政,缺乏有效、紧密的耦合与集成,导致营养盐输移模拟精度及机理解释存在瓶颈,可结合土壤水动力模型(如HYDRUS)、生物地球化学模型(如DNDC)以及地球物理探测技术等,实现土壤水文过程和营养盐输移循环精确模拟和耦合机制解析。

(3) 流域尺度土壤营养盐流失与风险评估。在解决上述问题(1)和(2)的基础上,可结合流域土地利用、地形、土壤性质等生成土壤水文响应单元,实现流域尺度土壤营养盐流失模拟和空间尺度拓展,进而揭示营养盐流失的热点时间、区域和驱动机制,对营养盐流失强度进行预测和风险评估,提出靶向性的流域营养盐和土地利用空间优化管控措施,从而为湖泊水体富营养化和流域面源营养盐污染控制提供决策支持。

致谢:感谢北京大学遥感与地理信息系统研究所范闻捷副教授在本文写作过程中给予的悉心指导。

文中部分插图由南京大学吕立刚博士、中科院南京地理与湖泊研究所赖晓明博士清绘,在此一并表示感谢!

参考文献(References)

- 常龙飞, 王晓龙, 李恒鹏, 等. 2012. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 28(5): 511-517. [Chang L F, Wang X L, Li H P, et al. 2012. Characteristics of soil nutrient loss with interflow from uplands as affected by land uses in low hill region of Chaohu Basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 28(5): 511-517.]
- 陈红, 冯云, 周建梅, 等. 2013. 植物根系生物学研究进展[J]. 世界林业研究, 26(5): 25-29. [Chen H, Feng Y, Zhou J M, et al. 2013. Research Advance of Plant Root Biology[J]. World Forestry Research, 26(5): 25-29.]
- 陈晓安, 杨洁, 汤崇军, 等. 2017. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J]. 农业工程学报, 33(9): 141-146. [Chen X A, Yang J, Tang C J, et al. 2017. Effects of rainfall intensity and slope on surface and subsurface runoff in red soil slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 33(9): 141-146.]
- 杜志勇, 刘苑秋, 郑诗樟, 等. 2007. 退化红壤区不同模式重建森林土壤水分空间变异性[J]. 水土保持学报, 21(5): 101-105. [Du Z Y, Liu Y Q, Zheng S Z, et al. 2007. Spatial variability of soil moisture in different models of rehabilitated forest in degraded red soil region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 21(5): 101-105.]
- 段剑, 刘窑军, 汤崇军, 等. 2017. 不同下垫面红壤坡地壤中流对自然降雨的响应[J]. 水利学报, 48(8): 977-985. [Duan J, Liu Y J, Tang C J, et al. 2017. Responses of subsurface flow characteristics to natural rainfall in red soil slopes of different surface covers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 48(8): 977-985.]
- 韩莹, 李恒鹏, 聂小飞, 等. 2012. 太湖上游低山丘陵地区不同用地类型氮、磷收支平衡特征[J]. 湖泊科学, 24(6): 829-837. [Han Y, Li H P, Nie X F, et al. 2012. Nitrogen and phosphorus budget of different land use types in hilly area of Lake Taihu upper-river basin[J]. Journal of Lake Sciences, 24(6): 829-837.]
- 侯旭蕾, 吕殿青, 王辉, 等. 2013. 坡度对红壤土坡面降雨侵蚀及水文过程的影响[J]. 灌溉排水学报, 32(6): 118-121. [Hou X L, Lv D Q, Wang H, et al. 2013. Effect of slope gradients on rainfall erosion and hydrological process on red soil land-slope[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 32(6): 118-121.]
- 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 2004. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J]. 地理学报, 59(3): 401-408. [Li H P, Liu X M, Huang W Y. 2004. The non-point output of different landuse types in Zhexi hydraulic region of Taihu Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 59(3): 401-408.]
- 林绍霞, 张清海, 张珍明, 等. 2012. 不同垦植模式茶园土壤性状及团聚体特征研究[J]. 水土保持研究, 19(6): 45-49. [Lin S X, Zhang Q H, Zhang Z M, et al. 2012. Research for soil properties and aggregates in tea plantation with different planting patterns[J]. Research of Soil and Water Conservation, 19(6): 45-49.]
- 刘宏伟, 高菲, 余钟波, 等. 2016. 湿润地区坡面土壤含水率时空变异性研究[J]. 水资源保护, 32(5): 17-23. [Liu H W, Gao F, Yu Z B, et al. 2016. Study on temporal-spatial variability of soil moisture content on hillslope in a humid area [J]. Water Resources Protection, 32(5): 17-23.]
- 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 2012. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展, 23(1): 38-45. [Wang X Y, Li Z X, Cai C F. 2012. Hydrological processes on sloped farmland in purple soil regions with rock fragment cover[J]. Advances in Water Science, 23(1): 38-45.]
- 谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 2015. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. 水科学进展, 26(4): 526-534. [Xie S H, Tu A G, Mo M H, et al. 2015. Analysis on the characteristic of interflow production processes on red soil slopes in the case of natural rainfall events[J]. Advances in Water Science, 26(4): 526-534.]
- 杨超杰, 贺斌, 段伟利, 等. 2017. 太湖典型丘陵水源地水质时空变化及影响因素分析: 以平桥河流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 26(2): 273-281. [Yang C J, He B, Duan W L, et al. 2017. Analysing the spatial and temporal variations and influencing factors of the water quality in a typical hilly water source of Lake Taihu Basin: A case study in Pingqiao river watershed[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 26(2): 273-281.]
- Bárdossy A, Lehmann W. 1998. Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: Geostatistical analysis[J]. Journal of Hydrology, 206(1-2): 1-15.
- Brolsma R J, van Vliet M T H, Bierkens M F P. 2010. Climate change impact on a groundwater-influenced hillslope ecosystem[J]. Water Resources Research, 46(11): 389-400.
- Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 58(5): 1501-1511.
- Freer J, McDonnell J J, Beven K J, et al. 2002. The role of bed-

- rock topography on subsurface storm flow[J]. *Water Resources Research*, 38(12): 1269.
- Fu B J, Yang Z J, Wang Y L, et al. 2001. A mathematical model of soil moisture spatial distribution on the hillslopes of the loess plateau[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 44(5): 395-402.
- Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, et al. 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls[J]. *Water Resources Research*, 33(12): 2897-2908.
- Hopp L, Harman C, Desilets S L E, et al. 2009. Hillslope hydrology under glass: Confronting fundamental questions of soil-water-biota co-evolution at Biosphere 2[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11): 2105-2118.
- Lan M, Hu H C, Tian F Q, et al. 2013. A two-dimensional numerical model coupled with multiple hillslope hydrodynamic processes and its application to subsurface flow simulation[J]. *Science China: Technological Sciences*, 56(10): 2491-2500.
- Liao K H, Lai X M, Liu Y J, et al. 2016. Uncertainty analysis in near-surface soil moisture estimation on two typical land-use hillslopes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 16(8): 2059-2071.
- Liao K H, Lai X M, Lv L G, et al. 2016. Uncertainty in predicting the spatial pattern of soil water temporal stability at the hillslope scale[J]. *Soil Research*, 54(6): 739-748.
- Liao K H, Lai X M, Zhou Z W, et al. 2017a. Applying fractal analysis to detect spatio-temporal variability of soil moisture content on two contrasting land use hillslopes[J]. *Catena*, 157: 163-172.
- Liao K H, Lai X M, Zhou Z W, et al. 2017b. Combining the ensemble mean and bias correction approaches to reduce the uncertainty in hillslope-scale soil moisture simulation[J]. *Agricultural Water Management*, 191: 29-36.
- Liao K H, Lv L G, Yang G S, et al. 2016. Sensitivity of simulated hillslope subsurface flow to rainfall patterns, soil texture and land use[J]. *Soil Use and Management*, 32(3): 422-432.
- Liao K H, Xu F, Zheng J S, et al. 2014. Using different multi-model ensemble approaches to simulate soil moisture in a forest site with six traditional pedotransfer functions[J]. *Environmental Modelling & Software*, 57: 27-32.
- Liao K H, Zhou Z W, Lai X M, et al. 2017. Evaluation of different approaches for identifying optimal sites to predict mean hillslope soil moisture content[J]. *Journal of Hydrology*, 547: 10-20.
- Lin H S, Bouma J, Wilding L P, et al. 2005. Advances in Hydropedology[J]. *Advances in Agronomy*, 85:1-89.
- McGuire K J, Weiler M, McDonnell J J. 2007. Integrating tracer experiments with modeling to assess runoff processes and water transit times[J]. *Advances in Water Resources*, 30(4): 824-837.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 12(3): 513-522.
- Pachepsky Y A, Rawls W J, Lin H S. 2006. Hydropedology and pedotransfer functions[J]. *Geoderma*, 131(3-4): 308-316.
- Penna D, Tromp-Van Meerveld H J, Gobbi A, et al. 2011. The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3): 689-702.
- Pionke H B, Hoover J R, Schnabel R R, et al. 1988. Chemical-hydrologic interactions in the near-stream zone[J]. *Water Resources Research*, 24(7): 1101-1110.
- Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. 2010. Spatial prediction of soil moisture content using multiple-linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 74(2): 208-220.
- Ritchie J T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. *Water Resources Research*, 8(5): 1204-1213.
- Schume H, Jost G, Katzensteiner K. 2003. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies*(L.) Karst.)-European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand[J]. *Geoderma*, 112(3-4): 273-287.
- Shi Y N, Baldwin D C, Davis K J, et al. 2015. Simulating high-resolution soil moisture patterns in the Shale Hills watershed using a land surface hydrologic model[J]. *Hydrological Processes*, 29(21): 4624-4637.
- Šimůnek J, Šejna M, van Genuchten M T. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[R]. Version 2.0. Riverside, CA, USA: Salinity Laboratory Agricultural Research Service.
- van Genuchten M T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892-898.
- van Genuchten M T. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone[R]. Riverside, CA, USA: US Salinity Laboratory.
- Vepraskas M J, Heitman J L, Austin R E. 2009. Future direc-

- tions for hypedology: quantifying impacts of global change on land use[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(8): 1427-1438.
- Wanke H, Dünkloh A, Udluft P. 2008. Groundwater Recharge Assessment for the Kalahari Catchment of North-eastern Namibia and North-western Botswana with a Regional-scale Water Balance Model[J]. *Water Resources Management*, 22(9): 1143-1158.
- Weiler M, McDonnell J J. 2007. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes[J]. *Water Resources Research*, 43(3): W03403.
- Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes[J]. *Journal of Hydrology*, 286(1-4): 113-134.
- Williams C J, Mcnamara J P, Chandler D G. 2009. Controls on the temporal and spatial variability of soil moisture in a mountainous landscape: the signature of snow and complex terrain[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7): 1325-1336.
- Zhao N N, Yu F L, Li C Z, et al. 2015. Soil moisture dynamics and effects on runoff generation at small hillslope scale[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(7): 1-13.
- Zhu Q, Schmidt J P, Bryant R B. 2012. Hot moments and hot spots of nutrient losses from a mixed land use watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 414-415: 393-404.
- Zhu Q, Schmidt J P, Buda A R, et al. 2011. Nitrogen loss from a mixed land use watershed as influenced by hydrology and seasons[J]. *Journal of Hydrology*, 405(3-4): 307-315.

Advances in research of hillslope soil hydrological processes in the humid region of Southeast China

LIAO Kaihua¹, LV Ligang²

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resource, Nanjing 210023, China)

Abstract: The humid region of Southeast China is one of the most prominent areas of environmental problems. Eutrophication of water bodies is a major problem that hampers the economic and social developments in the region. Especially in recent years, affected by government policies and market forces, the development of hilly and mountainous areas was intensified. Increasingly more virgin bamboo forests have been developed into economic land (such as tea garden). However, the land-use and land-cover change brings economic benefits as well as changes of soil pore structure and hydrological processes, which greatly affect the migration and transformation of nutrients in the soil. Within the National Natural Science Foundation of China (NSFC) supported project “Research on the physical mechanism and numerical simulation of hillslope soil hydrological processes in the hilly region of the Taihu Lake Basin” we made important progresses in the following three aspects: (1) spatiotemporal variations and influencing factors of hillslope soil moisture under different land use; (2) hillslope hydrological processes and water balance; and (3) influencing mechanism of hillslope soil hydrological processes. Despite these progresses, further research should focus on mechanisms of such processes, which would be of great importance for the control of eutrophication of the Taihu lake and non-point source pollution.

Key words: Taihu Lake Basin; hillslope scale; soil hydrological processes; numerical simulation; influencing factors