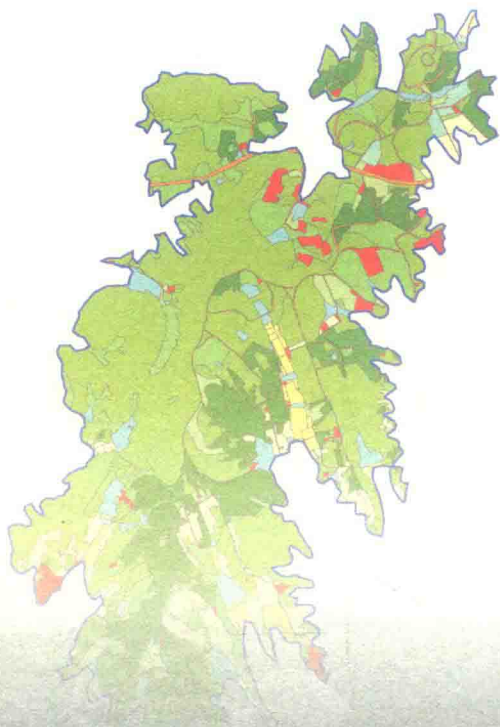


/ 土地利用与生态保护 /

土地利用变化的土壤水文效应研究： 以东南丘陵区为例

吕立刚 著



南京大学出版社

/ 土地利用与生态保护 /

土地利用变化的土壤水文效应研究： 以东南丘陵区为例

吕立刚 著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土地利用变化的土壤水文效应研究:以东南丘陵区为例/吕立刚著. —南京:南京大学出版社,2018.10

(土地利用与生态保护)

ISBN 978-7-305-21092-1

I. ①土… II. ①吕… III. ①太湖—流域—丘陵地—土地利用—生态环境保护—研究 IV. ①F323.211

②X321.26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 239820 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093

网 址 <http://www.NjupCo.com>

出 版 人 金鑫荣

丛 书 名 土地利用与生态保护

书 名 土地利用变化的土壤水文效应研究:以东南丘陵区为例

著 者 吕立刚

责任编辑 杨 博 吴 汀 编辑热线 025-83593947

照 排 南京紫藤制版印务中心

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 11.5 字数 154 千

版 次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-21092-1

定 价 48.00 元

网 址: <http://www.njupco.com>

官方微博: <http://weibo.com/njupco>

官方微信: njupress

销售咨询热线: (025)83594756

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

国家自然科学基金项目(41801169)

教育部人文社会科学基金项目(18YJCZH120)

江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2017777)

江苏省基础研究计划(省自然科学基金)项目(BK20180819)

国土资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2017CZEPK02)

联合
资助

前 言

太湖流域面临着严峻的水体富营养化问题,而面源营养盐的流失被认为是导致该流域水体富营养化与蓝藻水华频发的重要原因之一,已有研究表明面源营养盐的迁移与土壤水分运动分布密切相关,因此,研究土壤水分运动分布过程对于探讨营养物质循环和控制面源污染具有非常重要的环境意义。

太湖流域丘陵区面积 6 151.23 km²,占流域总面积的 16.67%,近年来,在政府鼓励和市场推动的双重作用下,该区域越来越多的生态型用地(竹林)向经济型用地(茶园、果园)转变,这种转变带来巨大经济效益的同时,土壤水分及壤中流的时空分布变化特征等地表关键土壤水文过程也发生着相应的变化,进而影响营养盐的输移循环并引发了河湖水质下降等一系列生态环境问题。当前太湖流域平原区的生态环境问题已引起高度重视,但对丘陵区关注较少。为此,本研究主要内容为太湖流域丘陵生态型用地向经济型用地改变对土壤水分运动分布的影响机制。

本书按照“现象机制-模型模拟-拓展应用”的研究框架,选取太湖流域丘陵区的南京市高淳区东坝镇青山茶厂的 2 个相邻但用地类型不同的坡面:竹林和茶园(2001 年前由竹林开发而来),分别代表太湖流域丘陵坡地的典型生态型用地和经济型用地。首先,构建了茶园和竹林土壤水分监测体系:高空间分辨率(8 m)的手动监测点 77 个,其中茶园 39 个,竹林 38

个;高频连续(5 min)的土壤水分自动监测系统 6 个,其中茶园 3 个,竹林 3 个。其次,结合降雨、地形和土壤性质等,识别出了土壤水分时空分布的主要控制因素。再次,利用 Richards 方程构建茶园和竹林坡面二维土壤水分运动模型,并依据时间稳定性理论,采用支持向量机方法,集成高空间分辨率的土壤水分手动监测数据和高时间分辨率的自动监测数据,构建了高时空分辨率的坡面土壤水分分布预测模型。最后,基于所构建的土壤水分运动、分布模型,依据土壤水分时空变异主控因素识别的结果,设置了降雨、土壤质地、坡度等多情境模式,预测了茶园和竹林坡面壤中流的变化特征,识别了茶园和竹林坡面在年度、季节、月份等不同时间尺度上土壤水分分布变化显著的区域,解译了土壤水分分布变化的冷热时间和区域,进而揭示太湖流域丘陵生态型用地向经济型改变对关键土壤水文过程、机制及其控制因素的影响。本书的研究结果可为基于面源营养盐流失的削减和拦截的土地利用优化设计提供科学依据。

目 录

前 言	1
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外相关研究进展	2
1.2.1 土壤水分基本概念及监测方法	2
1.2.2 土壤水分时空变异及主要控制因素	7
1.2.3 土壤水分分布运动及其模拟和预测	11
1.2.4 土壤水分分布变化的冷热点时间和区域识别	15
1.2.5 土地利用变化对土壤水文过程的影响	17
1.2.6 研究进展总结	23
1.3 研究目标与研究内容	23
1.3.1 研究目标	23
1.3.2 研究内容	24
第 2 章 研究区概况与数据获取	26
2.1 研究区概况	26
2.2 数据获取	30

2.2.1	监测样点设置	30
2.2.2	土壤水分监测	30
2.2.3	土壤性质测定	33
2.2.4	气象指标监测	35
2.2.5	地形因子提取	36
第 3 章	典型土地利用坡面土壤水分时空变异及其主控因子	38
3.1	研究区土壤水分干湿时期划分与时空变异分析方法	38
3.1.1	土壤水分干湿时期划分	38
3.1.2	土壤水分时空变异分析方法	39
3.2	典型土地利用坡面土壤水分时空变异特征	43
3.2.1	土壤水分时间变化特征	43
3.2.2	土壤水分分布空间结构	49
3.2.3	土壤水分分布空间格局	55
3.2.4	土壤水分时间稳定性	58
3.3	典型土地利用坡面土壤水分空间变异主控因子	64
3.3.1	主控因子识别	64
3.3.2	主控因子贡献程度	66
3.4	本章小结	69
第 4 章	典型土地利用坡面土壤水分运动分布模拟	72
4.1	典型土地利用坡面二维土壤水分运动模拟	72
4.1.1	坡面二维土壤水分运动模型构建	72
4.1.2	茶园坡面土壤水分运动模拟及验证	78
4.1.3	竹林坡面土壤水分运动模拟及验证	80
4.1.4	典型土地利用坡面土壤水分运动特征	82

4.2 典型土地利用坡面土壤水分空间分布高时空分辨率模拟	86
4.2.1 坡面土壤水分空间分布高时空分辨率模型构建	86
4.2.2 茶园土壤水分空间分布模拟	90
4.2.3 竹林土壤水分空间分布模拟	94
4.2.4 典型土地利用坡面土壤水分空间分布模拟差异	96
4.3 本章小结	100
第 5 章 典型土地利用坡面土壤水分运动分布过程解析	102
5.1 基于二维土壤水分运动模型的典型土地利用坡面壤中流量 估算	102
5.1.1 情境设置和敏感性分析	102
5.1.2 典型土地利用坡面壤中流量多情景估算	104
5.1.3 典型土地利用坡面壤中流量的主控因素及实践指导	106
5.2 基于高时空分辨率的典型土地利用坡面土壤水分分布冷热点 识别	110
5.2.1 冷热点时间和区域识别方法	110
5.2.2 典型土地利用坡面土壤水分分布变化的冷热点区域	112
5.2.3 典型土地利用坡面土壤水分分布变化的冷热点时间	116
5.2.4 典型土地利用坡面土壤水分分布变化的时间、区域的冷热 点差异及实践指导	122
5.3 本章小结	126

第 6 章 总结与展望 128

 6.1 主要结论 128

 6.2 研究展望 131

参考文献 133

附录 160

 插图目录 160

 表格目录 164

索引 166

后记 171

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

处于地表岩石圈、水圈、土壤圈和生物圈交互地带的地球关键带 (earth's critical zone) 的土壤水文过程与土壤、地形以及土地利用之间的交互关系, 以及由该交互关系所决定的物质能量的迁移和转化是近年来国内外关注的新兴交叉研究方向 (Pachepsky *et al.*, 2006; 李小雁, 2008; 张卫华等, 2008; Vepraskas *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2015)。研究土壤水文过程对探讨物质能量 (如营养盐) 在地表不同界面之间的输移和交换, 对控制面源污染有着重要意义 (Zhu *et al.*, 2012); 从生物地球化学角度来看, 土壤水文过程决定着物质和能量如何在各圈层界面之间转化和存储 (Lin *et al.*, 2009; 朱青等, 2015); 从物理角度来看, 土壤水文过程是物质迁移的主要驱动力之一。土壤水文过程影响土壤的理化性质, 并决定着土壤中水分和营养盐的有效性, 从而对作物产量和农业投入产出的经济效益有着重要的影响, 同时, 土壤水文过程影响土壤中营养盐和其他污染物质的迁移和循环, 因此对控制土壤和水体污染具有重要意义。

太湖流域作为我国经济最发达的区域之一, 同时也是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。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(Li *et al.*, 2004; 王鹏等, 2007; 陕永杰等, 2011)。太湖流域丘陵区面积 6 151.23 km², 占流域总面积的 16.67%。近年来, 在政府鼓励和市场推动的双重作用下, 该区域越来越多的生态型用地(竹林)向经济型用地(茶园、果园)转变(韩莹等, 2012)。而这种转变在带来巨大经济效益的同时, 土壤水分及壤中流的时空分布变化特征等地表关键土壤水文过程也发生着相应的变化(Hupet and Vanclooster, 2002; Xue *et al.*, 2003; 刘玉等, 2004; 王鹏等, 2009; Vepraskas *et al.*, 2009), 进而影响营养盐的输移循环并引发了河湖水质下降等一系列生态环境问题。当前太湖流域平原区的生态环境问题已引起高度重视, 但对丘陵区关注较少。坡面是土壤水文过程的基本空间单元, 但对太湖流域丘陵土壤水文过程研究多集中于宏观尺度(刘浏和徐宗学, 2012; 陈星等, 2012), 较少关注坡面尺度。

因此, 本书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 2 个相邻但用地类型不同的坡面: 竹林和茶园(2001 年由竹林开发而来), 分别代表生态型用地和经济型用地的丘陵坡地。通过分析茶园和竹林土壤水分时空变异特征及控制机制, 模拟其土壤水分运动分布过程, 预测在降雨、土壤质地、坡度等多情境模式下的壤中流通量, 识别土壤水分分布变化的冷热点区域和时间。深入探讨太湖流域丘陵典型土地利用类型转变对坡面土壤水分分布和运动特征等土壤水文过程的影响机制, 可为从土地利用角度研究面源污染物质输移提供理论依据, 并对设计和制定该区域水土资源可持续利用和农业水肥管理措施具有较强的现实意义。

1.2 国内外相关研究进展

1.2.1 土壤水分基本概念及监测方法

1.2.1.1 土壤水分基本概念

土壤水分(soil water/soil moisture)指的是地表以下至地下水面(潜

水面)以上土壤层中的水分,亦称非饱和带(unsaturated zone)中的水分(雷志栋等,1999)(图1-1),土壤水分定义为在一个大气压(1.01×10^5 Pa)下,在 105°C 条件下能从土壤中分离或者驱逐出来的水分。按照土壤水分存在的状态可分为固态水、气态水和液态水三种类型。其中数量最多的是液态水,包括束缚水(吸湿水、膜状水)和自由水(毛管水、重力水和地下水)。

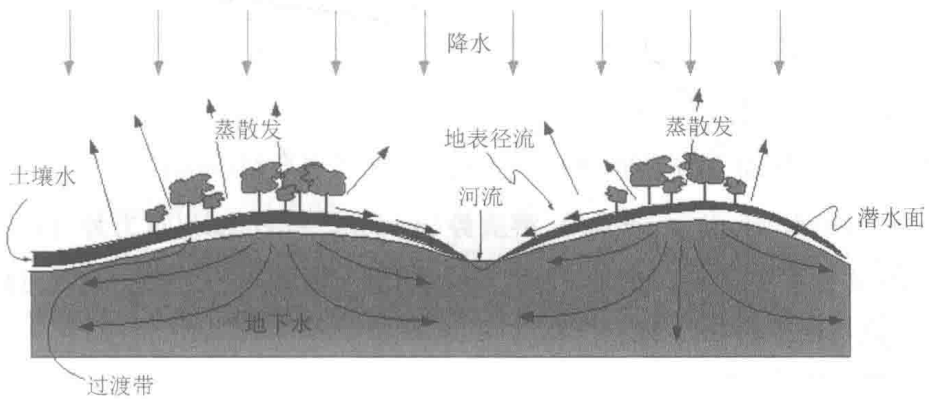


图1-1 土壤水分示意图(图片来源: <http://www3.geosc.psu.edu/>)

Fig. 1-1 Schematic representation of soil moisture movement

研究土壤水的方法主要可分为数量法和能量法。数量法主要关注土壤水的形态和数量,容易应用在一般农田条件下,具有很强的实用价值(雷志栋等,1999)。土壤水分含量是表征土壤水分数量特征的重要指标,常用的表示方法有质量含水量(θ_m)、容积含水量(θ_v)、相对含水量、土壤储水量。数量法按照土壤水分所受到不同的作用力,将其划分成不同的类型,但是在实际情况中,各种类型的土壤水分往往是受几种力的共同作用,难以对土壤水分运动进行精确定量,针对此缺陷,可以用能量法来解决(林大仪,2002)。能量法主要从土壤水受各种力作用后自由能的变化研究土壤水分的能态和动态、变化规律。1907年,Buckingham提出采用土壤水的能

量状态来研究土壤水的问题(朱铭莪等, 1993), 1920 年, Gardner 对 Buckingham 的概念和理论进一步拓展, 将不同形态的土壤水用能量概念联系起来。1977 年, 土壤水分的能量概念首次被介绍到国内(庄季屏, 1989)。土壤水分能量的概念引入准确的表明了水分移动的方向一定是从自由能高处向自由能低处移动, 用势能来解释土壤中水分的保持, 用水分特征曲线(soil water characterisitic curve)来表示土壤水蕴有的能量水平即水势(或吸力)的大小与土壤含水量之间的函数关系。土壤水势(soil water potential)可以作为判断土壤水分能态的统一标尺并且可以在土壤-植物-大气连续体(SPAC)(Philip, 1966)间统一使用。由于引起土壤水势变化的原因和动力的不同, 所以土壤水势包括了基质势(matric potential)、压力势(hydrostatic potential)、溶质势(osmotic potential)、重力势(gravitational potential)等。然而, 利用能态法测定土壤水分比较困难, 且很难保证较高的精度(刘思春等, 2011)。

1.2.1.2 土壤水分常用的监测方法

目前, 已有多种土壤水分测量方法(何其华等, 2003)。按照土壤水分的监测方法对土壤的干扰程度, 可以分为破坏性和非破坏性的方法。根据方法的本质可以分成直接性的和间接性的。直接性的方法包括烘干法; 间接法是通过测量与土壤水分相关的物理参数获得, 包括中子法、时域反射法、电容和 FDR 法、张力计法、伽马射线法、遥感法、电容传感器法、石膏分区法、压力板法、探地雷达法等。按照是否直接接触土壤可分为接触型和非接触型两类(Robinson *et al.*, 2008); 除了遥感方法(卫星、雷达、主动和被动传感器)外, 其他方法包括破坏性采样的烘干法在内均属于接触型土壤水分监测方法。常用的监测土壤水分方法包括以下几种:

(1) 烘干法(gravimetric method)。也称为称重法, 烘干法是测定土壤含水量的标准方法, 常作为其他测定方法的依据。常用方法是将土壤样品

放到 105 °C 的恒温箱中烘 24 h 直至恒重,所失去的水分质量和达恒重后干土质量的比值以百分数表示。取样的大小和取样的多少是烘干法测定土壤含水量需要注意的问题(邵明安等,2006)。

(2) 中子法(neutron probe technology)。1963 年起,中子法开始应用于水文领域的土壤水分定量化研究(Chanasyk, 1996)。基本原理是通过记录快中子遇到与质量相近的氢原子变为慢中子的数量来计算土壤含水量(Belcher, 1950;何其华等,2003)。中子法测量迅速,数据精确,特别适用于深层土壤水分的测量,并且不受土壤水状态影响,例如孟秦倩等(2012)和 Yi 等(2014)均用该法分别对于延安市飞马河小流域黄土山地不同深度和黑河流域中部不同景观类型土壤水分变化进行了监测。但中子有辐射性,对身体健康有一定影响。

(3) 时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)。基本原理是利用电磁波在不同介质中的传播速度的不同来测定土壤含水量。电磁波的传播速度与介电常数有关,土壤的介电常数大小主要取决于土壤中水的含量,因此通过测定土壤介电常数可求出土壤的含水量。TDR 最先是由 Topp 等(1980)引入并建立了标准的测量土壤水分的方法,较为广泛的应用在国内外点位土壤水分监测中(王晓贤和张学培,2009),例如 Western 等(1999;2004)使用 TDR 在澳大利亚 Tarrawarra 流域监测了不同地形表层(30 cm 深度,520 个样点)土壤水分的空间变异。龚元石等(1997)将 TDR 技术与中子仪和土钻法测定农田土壤水分的精度进行比较,认为 TDR 最精确且稳定性好。

(4) 频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)。FDR 与 TDR 类似,然而由于 TDR 测量时应用超高速延迟测量技术导致成本太高。1992 年,荷兰学者 Hilhorst 提出了频域分解方法,将测量中的时间问题转化成了频谱分析问题,并开发出了一种用于 FDR 土壤水分传感器的专门芯片,提高了 FDR 土壤水分传感器的可靠性并降低了生产成本(宋克

鑫,2013)。但该方法需要进行校正并且易受容重(龚元石等,1999)、温度、盐分的影响(Dobriyal *et al.*, 2012)。Lin 和 Zhou(2008)采用 EC-10 (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA)土壤水分探头监测美国宾夕法尼亚州的 Shale Hills 集水域的土壤水分变化;Li 等(2014)用 EC-5 土壤水分探头监测太湖流域典型土地类型不同深度(10 cm,20 cm,40 cm,60 cm)土壤水分动态变化及其对降雨的响应模式。

(5) 遥感法(remote sensing)。主要原理是测量土壤表面发射或反射的电磁能量,然后分析遥感信息与土壤水分的关系,建立两者之间的信息模型,从而得到土壤水分含量(Romshoo, 2004; 杨涛等, 2010; 吴黎等, 2014)。遥感方法是获取流域(杨胜天等,2003)、区域及大陆等较大尺度土壤水分的快速有效的方法(Zhu *et al.*, 2012)。几乎所有的电磁波段都可以用来监测土壤水分,但是微波是最为适合定量土壤水分条件的波段(Engman, 1995)。Champagne 等(2011)采用 AMSR-E 被动微波遥感数据监测了加拿大西部草原地区阿尔伯塔省(Alberta)的农田土壤水分。然而采用遥感监测土壤水分受到植被、下垫面粗糙度、土壤含盐量、土地利用等环境因子的影响及空间分辨率相对较低的限制。

(6) 张力计法(tensiometers)。基本原理是将有连接管的多孔陶土杯插入被测土壤后,管内自由水通过多孔陶土壁与土壤水接触,经过交换后达到水势平衡,从张力计读到的数值为土壤水(陶土头处)的吸力值,即忽略重力势后的基质势的值,根据土壤含水量与基质势之间的关系(土壤水特征曲线)可以确定土壤的含水量。张力计法适用于砂质土壤,不受土壤中盐分的影响(Hensley & Deputy, 1999),可以准确估计土壤水分特征曲线湿润段的基质势值,并且可以原位测定土壤水分的连续变化。该方法具有廉价精度高的优点,但是耗时较长,受空间尺度限制,并且仅适用于压力水头在 0~70 kPa 范围内的土壤水分测定,不适用于干燥土壤,在冬季测量值受冻融作用的影响显著(Wallhan, 1939)。

土壤水分监测的每种方法在成本、精度、适用的范围、测量的时间上均有优点和局限性(Dobriyal *et al.*, 2012)。采用何种监测方法取决于研究的目的、尺度、取样频率、所需数据的精确性和可靠性,因此没有可以适用于所有研究需要的通用方法,在小尺度上一般采用实测的方法,在较大尺度则更多采用遥感反演土壤水分的方法。

1.2.1.3 小结

监测坡面尺度土壤水分可选用常规的土壤水分监测和安装土壤水分自动监测探头等方法。烘干法、时域反射技术等常规土壤水分监测方法均属样点式手动式测定法,具有可测土层多、数据精确、不受大气和植被的影响、可布设较多样点等优点,该方法可获得的土壤水分信息具有较高的空间分辨率,但因其耗时耗力导致采样频率较低,无法获取连续高时间分辨率的土壤水分信息。土壤水分自动监测方法可获得土壤水分变化的高频信息,该方法具有便捷、数据连续等优点,但所需的实验设备价格昂贵,仅适合布设少量样点,难以形成较好的空间覆盖(空间分辨率)。因此,在坡面尺度如何集成传统手动监测方法与点位自动监测方法,兼顾土壤水分监测的时间分辨率和空间分辨率,是土壤水分监测研究的难点之一。

1.2.2 土壤水分时空变异及主要控制因素

1.2.2.1 土壤水分时空变异

土壤水分时空变异(或者土壤水分异质性)是指在一定空间尺度内,不同时间、地点和土层的土壤水分特征存在明显的差异性和多样性(Western *et al.*, 1999; 邱扬等, 2007),土壤水分时空变异是一定尺度范围内蒸散与降水、水分在土壤中纵向和横向再分配等复杂过程作用的结果(Western *et al.*, 1998a)。土壤水分时空变异一直是水文学、土壤学等领域研究的热点(Western & Blöschl, 1999; Robock, 2000)。土壤水分的时间差异是指土