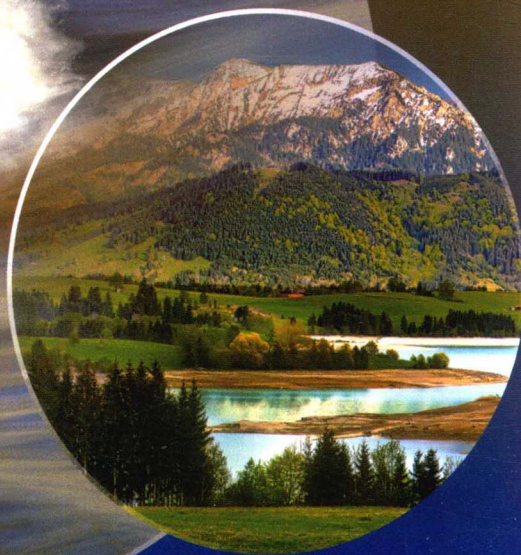


土壤水文异质性 对流域水文过程的影响

贺缠生 张兰慧 王一博 著



科学出版社

土壤水文异质性对流域 水文过程的影响

贺缠生 张兰慧 王一博 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

土壤水文性质是指影响土壤下渗、产流、蒸散发等各个水文过程的土壤物理和化学性质,其异质性是指土壤水文性质在不同时空尺度的差异性。本书旨在揭示土壤水文性质的异质性及其对流域水文过程的影响机制,以更准确地描述和模拟流域水文过程。本书分8章系统地介绍了土壤水文异质性在国内外的研究进展、黑河上游土壤水文性质的时空分布特征及其与环境因子的关系,以及土壤水文性质的异质性对流域水文过程的影响机制及模拟分析。

本书可作为从事土壤水文性质异质性及其影响研究的人员的工具书和参考书,供水文及水资源、环境科学、环境工程、地下水科学与过程、生态科学、自然地理等领域的专家、学者、研究生,以及高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土壤水文异质性对流域水文过程的影响 / 贺缠生, 张兰慧, 王一博著.
—北京: 科学出版社, 2018.5
ISBN 978-7-03-057331-5

I. ①土… II. ①贺…②张…③王… III. ①土壤水—影响—水文学—研究 IV. ①P33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 092036 号

责任编辑: 杨帅英 赵 晶 / 责任校对: 韩 杨
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 图阅社

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年5月第一次印刷 印张: 9 1/4 插页: 8

字数: 240 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

土壤是联系大气水、地表水、地下水和植物水并进行水分交换的核心地带，既是储藏和交换碳、氮、磷等多种营养元素和气体的载体，也是动植物及微生物相互作用的复杂生态系统。受气候、母质、地貌和生物多样性等自然因素与人为活动的综合作用，土壤类型有明显的区域性和地带性差异，与其相对应的土壤物理、化学和生物性质均有着极强的异质性。土壤水文性质是指影响水文过程的土壤物理和化学性质的各种参数，也是研究土壤水分和溶质运移的重要参数。土壤水文性质的异质性则是上述各种参数在不同时空尺度的差异性。土壤水文性质的空间异质性直接影响地球表面气候、生态和水文过程及其相互作用。针对土壤水文异质性开展研究，辨识不同尺度上影响水文过程的主要土壤水文性质因子，分析土壤水文异质性和流域生态-水文过程的影响机制，更准确地描述和模拟水文过程，提高流域生态-水文模拟的连续性和准确性，为流域水资源评价、合理配置和高效管理提供科学依据，推动流域生态环境保护和经济社会可持续发展。

过去几十年，国内外相关研究主要关注土壤水文性质的获取与计算。近年来，土壤水文异质性和水文过程影响的研究开始受到越来越多的重视。但受限于采样和分析难度，土壤水文异质性的研究主要集中在土壤入渗特性、土壤水分、土壤质地及土壤容重等较易测定的土壤物理性质上，且相关研究也多集中在点尺度数据的对比分析上，鲜有土壤水文性质异质性和水文过程影响的研究。

在国家自然科学基金委员会“黑河流域生态-水文过程集成研究”计划的支持下，该书作者自2012年以来连续五个夏秋在祁连山区坚持野外监测，艰苦卓绝，风餐露宿，克服了重重困难，开展“黑河上游土壤水文异质性观测试验及其对山区水文过程的影响”的研究工作。项目组基于建立的样点-样带-流域土壤水文性质观测体系，测定土壤水文性质并观测相应的水文过程，揭示土壤水文异质性和流域水文过程的影响机制，更准确地描述和模拟了流域水文过程。该书系统地介绍了土壤水文异质性和国内外的研究进展，黑河上游土壤水文性质的时空分布特征及其与环境因子的关系，以及土壤水文性质的异质性和流域水文过程的影响机制及模拟分析。该书的出版可为流域生态-水文模型参数优化、过程耦合、水资源合理配置和高效管理提供科学依据，进一步推动流域生态-水文过程的研究。

中国科学院院士 傅伯杰
2017年12月

前 言

土壤层是大气水、地表水、地下水和植物水发生联系并进行水分交换的核心地带，也是储藏和交换碳、氮、磷等多种营养元素与气体的载体，还是一个由动植物及微生物组成并相互作用的复杂生态系统。土壤的形成、变化和空间分布直接影响地球表面化学、气候、生态和水文过程及其相互作用。受气候、地质、地貌和生物多样性的影响，土壤的物理、化学和生物性质有着极强的异质性。土壤水文性质异质性（即影响土壤下渗、产流、蒸散发等各个水文过程的土壤物理和化学性质的各种土壤水文参数在不同时空尺度的差异性）研究，特别是定量化研究，可以辨识不同尺度上影响水文过程的主要土壤水文性质因子，分析土壤水文异质性对流域水文过程的影响机制，更准确地描述和模拟水文过程，提高流域水文模拟的连续性和准确性，为流域模型集成、水资源评价、合理配置和高效管理提供科学依据和支持，推动流域生态环境保护和经济社会系统可持续发展。

过去几十年，大量的水文研究涉及土壤水文性质获取与计算，土壤水文异质性对水文过程影响的研究也开始受到越来越多的重视。国内对土壤性质空间变异性的研究起步较晚。进入 20 世纪 80 年代以后，我国学者才逐渐认识到土壤性质空间变异性研究的重要性和实用性，并先后在土壤调查和土壤水分变异等方面进行了研究。目前，土壤空间变异性研究主要集中在土壤入渗特性、土壤水分、土壤质地及土壤容重等较易测定的土壤物理性质上，关注土壤化学性质及其影响的研究较少。受限于采样和分析难度，相关研究也多集中在点尺度数据的对比分析上，且鲜有土壤水文性质的异质性对水文过程影响的研究。

流域是地球系统的基本单元，无论从水文学、生态学还是从社会经济学角度，流域都是对生态-水文问题进行综合研究的最佳对象。因此，以流域为单元，建立遥感-地面一体化的综合集成观测系统是当前地球表层系统科学研究中的一个重要趋势。国家自然科学基金委员会于 2010 年启动的“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划(简称“黑河计划”)以我国西北黑河流域为典型研究区，从系统学思路出发，通过建立包括观测、实验、模拟、情景分析及决策支持等环节的“以水为中心的生态-水文过程集成研究平台”，揭示不同尺度（叶面尺度、个体植物尺度、群落尺度、景观尺度与流域尺度）上的生态-水文过程相互作用规律，研究气候变化和人类活动共同影响下内陆河流域的生态-水文过程机理，发展生态-水文过程尺度转换方法，建立耦合生态、水文和社会经济的流域集成模型和水资源管理决策支持系统。“黑河计划”旨在提高对内陆河流域水-生态-经济系统演变的综合分析预测预报能力，为国家内陆河流域水安全，生态安全，以及经济的可持续发展提供基础理论和科技支撑，使我国流域生态-水文研究进入国际先进行列。

为了弥补黑河流域土壤水文研究的不足，在国家自然科学基金委员会“黑河计划”

的支持下,我们开展了“黑河上游土壤水文异质性观测试验及其对山区水文过程的影响”的研究工作。本书在黑河上游干流和中西部水系建立了样点-样带-流域土壤水文性质观测体系,测定土壤水文属性并观测相应的水文过程,揭示土壤水文性质空间异质性;阐明土壤水文异质性分布与环境因子的关系,发展空间尺度拓展方法;改进现有分布式水文模型,分析土壤水文异质性对流域水文过程的影响机制,为黑河流域生态-水文模型集成提供参数和数据基础,为水资源合理配置和高效管理提供科学依据,推动黑河流域乃至整个内陆河流域生态-水文研究工作。本书的创新之处在于:①建立黑河流域上游样点-样带-流域尺度土壤水文性质的整体观测体系,揭示土壤水文性质的空间变异规律,阐明水文过程与土壤水文性质和环境变量之间的关系;②基于数据观测、过程分析和模型模拟,揭示土壤水文异质性对流域水文过程的影响机制。

本书各章节是基于我们研究项目的结果撰写的,包括我们团队发表的论文、博士后出站报告、博士和硕士研究生毕业论文等。编写分工如下:第2章由田杰编写;第3章由王一博和王忠富编写;第4章由杨礼箫和李金麟同学编写;第5章由张兰慧、赵琛和白晓编写;第6章由顾娟、张兰慧、金鑫、杨礼箫和蒋忆文编写;第7章由田杰和金鑫编写,其余各章由贺缠生编写,并由张兰慧统稿,最后由贺缠生定稿。在此衷心感谢国家自然科学基金委员会对我们的支持,感谢所有参与“黑河上游土壤水文异质性观测试验及其对山区水文过程的影响”项目的成员的精诚协作和辛勤努力。“旱区流域科学与水资源研究中心”研究团队,特别是王一博教授、张兰慧博士、李金麟、赵琛、田杰、张喜风、金鑫、吴维臻、蒋忆文、杨礼箫、白晓和王忠富等成员,自2012年以来连续五个夏秋在祁连山区艰苦卓绝,风餐露宿,克服重重困难,建立黑河上游土壤水文定位观测体系,取得了宝贵数据。各位老师、同学的辛苦付出是本书得以成形的基础。同时,杨礼箫、韩智博、祝毅、曾晟轩、王学锦、朱昱作、谈幸燕、张明敏等先后进行整理文稿、校对和制图等,借此机会一并表示衷心的感谢。

本书是笔者自2011年受聘中央组织部国家“千人计划”特聘专家和兰州大学“千人计划”特聘教授后,在国家自然科学基金委员会“黑河流域生态-水文过程集成研究”计划重点研究项目和兰州大学“千人计划”特聘教授科研启动资金的共同支持下完成的。在此期间,在工作和生活上得到了兰州大学西部环境教育部重点实验室、原西部环境与气候变化研究院、资源环境学院及校和相关部门领导与同仁的多方帮助和大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中不足与疏漏之处在所难免,敬请各位专家学者与广大读者给予批评指正,以便对本书进行进一步的修改和完善。

贺缠生

2017年11月

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 目的与意义	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 土壤水文性质空间分布研究	2
1.2.2 土壤水文性质及过程原位监测和尺度拓展	3
1.3 土壤水文异质性对水文过程的影响	7
1.4 流域土壤水文研究进展	9
1.4.1 “黑河流域生态-水文过程集成研究”计划背景	9
1.4.2 黑河流域土壤水文研究进展	10
参考文献	11
第2章 研究区概况	20
2.1 自然地理概况	20
2.1.1 地理位置	20
2.1.2 地质地貌	20
2.1.3 土壤与植被	20
2.2 水文气象特征	21
2.2.1 气象特征	21
2.2.2 水文特征	22
2.3 生态环境概况	24
参考文献	25
第3章 黑河上游土壤水文性质的观测与分析	26
3.1 黑河上游土壤水文要素观测体系建立	26
3.1.1 径流场的建立	26
3.1.2 定位观测点的建立	26
3.2 黑河上游土壤入渗过程	28
3.2.1 典型草地人工降雨试验	28
3.2.2 典型草地模拟人工降雨入渗特征	30
3.2.3 典型草地模拟人工降雨入渗过程	32
3.3 黑河上游草地蒸散发过程	33
3.3.1 冻结期草地蒸散发的日变化	33

3.3.2	生长前期草地蒸散发的日变化.....	35
3.3.3	生长期草地蒸散发的日变化.....	35
3.3.4	生长后期草地蒸散发的日变化.....	36
3.4	黑河上游地表产流过程.....	38
3.4.1	典型草地人工降雨产流特征.....	38
3.4.2	典型草地人工降雨产流过程.....	40
	参考文献.....	42
第4章	黑河上游土壤水文要素空间分布特征.....	43
4.1	黑河上游土地利用/覆被变化模拟及分析.....	43
4.2	土壤质地的空间异质性.....	46
4.2.1	类型划分.....	47
4.2.2	黑河上游土壤质地研究.....	49
4.2.3	土壤质地空间分布拓展方法.....	49
4.3	土壤有机质的空间分布.....	51
4.3.1	土壤有机质采样及实验分析.....	51
4.3.2	尺度拓展方法.....	51
4.3.3	有机质空间分布特征.....	53
	参考文献.....	54
第5章	土壤水分的空间分布.....	58
5.1	黑河上游土壤水分的空间分布.....	58
5.1.1	不同土地覆被类型下土壤水分差异特征.....	58
5.1.2	不同土地覆被类型下土壤水分剖面分布特征.....	59
5.2	黑河上游土壤水分的空间分布与环境因子的关系.....	61
5.2.1	黑河上游0~50 cm土壤水分空间分布特征.....	61
5.2.2	流域尺度土壤水分空间变异的影响因素.....	62
5.2.3	坡面尺度土壤水分与地形因子的关系.....	64
5.3	遥感土壤水分产品及应用.....	68
5.3.1	主流卫星遥感土壤水分产品.....	68
5.3.2	遥感土壤水分产品应用.....	70
5.4	黑河上游土壤水分的遥感估算及分析.....	72
5.4.1	土壤水分的遥感估算.....	72
5.4.2	土壤水分时间变化特征.....	74
	参考文献.....	78
第6章	黑河上游流域水文过程模拟.....	82
6.1	黑河上游干旱评估.....	82
6.1.1	标准化降水指数.....	82
6.1.2	水文干旱指数.....	87
6.1.3	帕默尔干旱指数(PDSI).....	89

6.1.4 干旱指数对比分析.....	92
6.2 黑河流域植被生态系统生产力的遥感模拟.....	93
6.2.1 NPP 遥感估算原理及模型结构.....	94
6.2.2 基础数据.....	96
6.2.3 黑河流域年 NPP 时空变化.....	96
6.3 基于 MODFLOW 的山区地下水径流数值模拟.....	98
6.3.1 大都麻河上游概况.....	99
6.3.2 研究数据.....	99
6.3.3 MODFLOW 模拟方案.....	99
6.3.4 大都麻河地下水分布.....	104
6.3.5 小结.....	107
6.4 流域水文过程的分布式模拟.....	108
参考文献.....	113
第 7 章 土壤水文性质的空间变异性对水文过程的模拟分析.....	116
7.1 对土壤入渗及土壤水分过程的影响分析.....	116
7.1.1 饱和导水率测量.....	117
7.1.2 黑河上游饱和导水率分布及影响.....	119
7.2 对水文过程的影响模拟.....	126
7.2.1 土壤属性数据归类处理.....	126
7.2.2 流域土壤性质对水文过程的影响.....	127
参考文献.....	128
第 8 章 结论和建议.....	133
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 目的与意义

土壤层是大气水、地表水、地下水和植物水发生联系并进行水分交换的核心地带，也是储藏和交换碳（C）、氮（N）、磷（P）等多种营养元素和气体的载体，还是一个由动植物及微生物组成并相互作用的复杂生态系统。土壤的形成、变化和空间分布直接影响地球表面化学、气候、生态和水文过程及其相互作用（Jury and Horton, 2004; Amundson et al., 2015）。就水循环而言，土壤水（绿水）提供了全球农业生产 90% 的水分需求，相当于全球 65% 的淡水资源量（Amundson et al., 2015）。

受气候、地质、地貌和生物多样性的影响，土壤的物理、化学和生物性质有着极强的异质性（Amundson et al., 2015）。土壤水文性质，指的是直接或间接影响土壤下渗、产流、蒸散发等各个水文过程的土壤物理和化学性质，主要指标有土壤质地、结构、孔隙度、容重、入渗率、饱和导水率、土壤水分特征曲线和有机质等（Bormann and Klaassen, 2008）。土壤水文性质是研究土壤水分和溶质运移的重要参数（Nielsen et al., 1973; Rawls and Brakensiek, 1982; Merz and Plate, 1997; Saulnier et al., 1997），各种土壤水文参数在不同时空尺度表现出较强的差异性（王军等，2002；邵明安等，2006），即使在土壤质地相同的微地域，同一时刻不同位置上的土壤水文属性值也是不同的。土壤水文的异质性在地形复杂、下垫面变化强烈的山区尤为明显（华孟和王坚，1992）。土壤水文性质的空间异质性对水文过程有明显影响。例如，入渗率高的砂性土壤，降水入渗快，深层渗漏大，相应地，产生地表径流和蒸散量都较小；而入渗率低的黏性土壤，水文过程则恰恰相反（Jury and Horton, 2004）。流域径流及其他水分平衡分量的分配在很大程度上受土壤水文性质的制约（Merz and Plate, 1997; Tague, 2005; Zimmermann et al., 2006; McDonnell and Beven, 2014; Hailegeorgis et al., 2015; Mekonnen et al., 2016）。

土壤水文性质异质性的研究，即基于观测资料或数据，得到各土壤水文性质参数的时空变化特征、参数自身及参数之间的时空关系，将分析成果应用于确定合理的观测点或采样数目，对观测点的参数进行最优估值等，并分析预测土壤水文性质参数状态变量的时空分布（MeBratuey and Pringle, 1999）。土壤水文性质异质性的研究，特别是量化研究，可以辨识不同尺度上影响水文过程的主要土壤水文性质因子，分析土壤水文异质性对流域水文过程的影响机制，更准确地描述和模拟水文过程，提高流域水文模拟的连续性和准确性，为流域模型集成、水资源评价、合理配置和高效管理提供科学依据和支持，推动流域生态环境保护和经济社会系统可持续发展（Nijzink et al., 2016）。

1.2 研究进展

过去几十年, 有大量的水文研究涉及土壤水文性质获取与计算 (雷志栋和谢森传, 1982; Saulnier et al., 1997; Romano and Palladino, 2002; Vereecken et al., 2015), 土壤水文异质性和水文过程的影响也开始受到越来越多的重视 (Pachepsky et al., 2006; Bouma et al., 2011)。本节就国内外土壤水文异质性和水文过程影响的研究进展介绍如下。

1.2.1 土壤水文性质空间分布研究

土壤变异可分为系统变异和随机变异两大部分。一方面利用大量数据建立统计诊断指标, 将土壤划分成仅有内部随机变异的分类或制图单元, 从而使单元间的变异为最大, 即将土壤变异梯度最大处作为划分界线。另一方面在田间实验和土地利用规划中, 以统计学原理设置采样点, 测定土壤变异性的某些指标, 如估计方差、标准差、变异系数等, 并在推广田间技术和土地利用经验时, 考虑土壤变异性的影响 (沈思渊, 1989)。

田间实地调查表明, 在同一类型土壤中, 土壤特性表现出明显的差异性; 在土壤质地相同的区域内, 土壤特性参数在各个空间位置上也不相同。对于这种差异性, 以往多采用 Fisher 所创立的传统统计方法来进行分析 (Burrough, 1983a, 1983b)。地统计学则可用于土壤特性空间变异研究的定量分析。Campbell (1978) 在研究两个土壤制图单元中砂粒含量和 pH 变异时, 首先使用了地统计学。大量的研究将地统计学引入土壤科学中 (Burgess and Webster, 1980; Burrough, 1983a, 1983b; Webster and Burgess, 1980; Yost, 1982a, 1982b)。美国于 20 世纪 70 年代后期陆续将地统计学理论应用于土壤调查、制图及土壤变异性的研究中。到了 80 年代, 统计学方法已成为研究空间变异最常用的方法, 并取得了很大成就。地统计学既可用于估测土壤性质的分布, 也可用于确定土壤变异的尺度和模式, 以提高采样的有效性, 还可用于研究引起土壤变异的各过程。随着对土壤研究的加深和数学统计方法的普及, 一些新方法, 如基于序贯仿真的马尔科夫链 (Markov chain sequential simulation, MCSS)、人工神经网络等也被逐步应用到土壤性质空间变异性的分析中。

国内对土壤性质空间变异性的研究起步较晚。进入 20 世纪 80 年代以后, 我国学者才逐渐认识到土壤空间变异研究的重要性和实用性, 先后在土壤调查和土壤水分变异等方面进行了研究。90 年代以来, 我国土壤空间变异性研究取得了长足发展。

目前, 土壤空间变异性研究主要集中在土壤入渗特性、土壤水分、土壤质地及土壤容重等较易测定的几个土壤物理性质, 关注土壤化学性质及其影响的研究较少。受限于采样和分析难度, 相关研究也多集中在点尺度数据的对比分析上。由于黑河上游属于高寒山区, 季节性冻土约占其面积的 65% (宁宝英等, 2008), 对水文过程产生重要影响 (Zhang et al., 2016)。国内对青藏高原多年冻土区土壤水文特征的研究更多地集中于土壤入渗过程, 以及区域面上土壤水分特征曲线的研究, 鲜有基于土壤纵向不同深度土层

的土壤水分特征曲线的研究(文晶等, 2013)。

1.2.2 土壤水文性质及过程原位监测和尺度拓展

1. 原位观测

目前进行原位观测的土壤水文性质主要有土壤水分、入渗率、土壤粒度分布、土壤有机质含量、土壤饱和导水率等。土壤水分是获得关注最多的土壤水文性质, 其观测从20世纪中叶就开始进行了。当前, 土壤水分测定方法主要有以下几类。

(1) 烘干法。该方法是通过高温将土壤中的水分与土壤分离后, 以质量或体积的形式计算土壤水损失量, 从而计算得出土壤质量或体积含水量。该方法是最为传统的土壤水分测定方法, 也是土壤含水量测定的标准方法, 一直沿用至今。它的优点是测定精度高、误差小, 而缺点则是耗时费力, 且采样时会破坏原状土。

(2) 电磁感应传感器法。这类方法是利用电磁性质(如介电性)测定土壤含水量一类方法的总称, 包括3种测定仪器: 频率反射仪(frequency domain reflectometry, FDR)、时域反射仪(time domain refractometer, TDR)和时域传输仪(time domain transmission, TDT)。其中, TDR类型有针式TDR和管式TDR两种, 国内广泛使用的为德国IMKO公司生产的TRIME等。TDR法测量精准, 且便于携带, 测量时对于土壤无破坏性, 已成为土壤含水量测定的常用方法之一(Mittelbach et al., 2012)。与TDR相比, TDT省电且价格相对便宜, 因而成为近年来土壤水分监测的常用方法(Blonquist et al., 2005)。FDR虽然测量精度不如TDR与TDT, 但在对研究地区采样进行校正之后, 其精度也可达到相对理想程度; 而且由于它的测定速度明显快于TDR和TDT, 因此其在大尺度大规模(流域或者区域)水文或者农业观测实验中应用更广。

(3) 热脉冲法。该方法通过传感器的一个针头发短热脉冲, 随后在传感器另一个针头处测量其温度反应, 进而得到土壤水分值(Campbell et al., 1991)。Bristow(1998)通过室内和田间试验测试发现该方法可以应用, 但是仍存在高估土壤水分的情况。

(4) 遥感法。遥感法根据其成像原理差异主要分为主动遥感和被动遥感。主动遥感是接收其感应器发出的辐射波, 该辐射波在遇到目标物体后反射, 感应器再接收该辐射波, 基于该分析目标物体然后成像。在土壤水分测量中, 应用广泛的主动遥感技术或仪器包括高分辨率相机、雷达、ASCAT(advanced scatterometer)等。主动遥感有较高的空间分辨率, 其精度大多为30~1000m, 有些甚至能够达到10m之内, 但容易受到天气条件限制。被动遥感的感应器本身不发射辐射波, 只被动接受目标物体的辐射波。常见的被动遥感技术或仪器主要是卫星遥感技术, 包括AMSR-E(advanced microwave scanning radiometer-earth observing system)和SMOS(soil moisture and ocean salinity)等。与主动遥感相比, 被动遥感技术时间分辨率相对较高, 一般为1~3天; 但是缺乏较高的空间分辨率, 其空间分辨率多为25~50 km。当前, 遥感土壤水野外原位观测土壤入渗率的设备包括单环及双环入渗仪(Lai and Ren, 2007)、圆盘入渗仪(Reynolds and Elrick, 1991)、Hood入渗仪等(Buczko et al., 2006)。原位观测可以保证数据的

准确性,但由于其空间异质性,入渗率的大小会随着测量尺度的变化而变化(Lai and Ren, 2007)。

单环入渗试验可分为定水头和变水头入渗试验两种,试验设备简易,操作简单,野外携带方便,并具有自由调节试验区大小的特点,可用以反映土壤水力性质的空间尺度变化(程勤波等, 2010)。

双环入渗仪也是一种简单设备,用来测量水渗入土壤的渗透速度。渗透速率是指单位时间内单位表面积的水渗入量,可通过测量结果和达西定律计算而得。标准装置包括数套不同直径的不锈钢环,可同时进行几个测量,以得到正确可靠的结果。垂直渗透水流向边缘时,入渗仪的外环就可以起到隔离的作用。由于内环中的水是垂直流动的,因而测量仅限于在内环中进行。要取得满意的测量结果,一定要考虑以下几个可能影响测量的因素:表面植被、土壤的紧压程度、土壤温度及土壤分层。一般使用方法如下:①把双环放到试验地点,双手按压双环置入土壤或用铁锤敲击均匀进入土壤;②用马氏瓶给内外环同时供水,保持同一水位不变;③用秒表记录试验时间,同时记录马氏瓶相应水位的变化。

圆盘入渗仪由于操作快速简单,便于测定田间表层土壤水力特征,目前已成为田间测定土壤水力参数的常用仪器,且近年来得到了较快发展。Angulo等(2000)对有关研究进行了评述,指出圆盘入渗仪将成为未来田间测定表层土壤水力参数的重要手段。圆盘入渗仪的入渗过程被认为是三维入渗,其入渗过程可以用Richard方程来描述。但在入渗开始的短时间内,圆盘入渗忽略了重力作用和扩散作用,可看作一维入渗(Philip, 1969)。

Hood入渗仪用于测量土壤的入渗速率。该方法无需接触层,压头直接安装在土壤表面,通过导水管导水,可随时补充压力且直接读数。其特点如下:①渗透室直接位于土壤表面,无需专门的接触层,也不需要土壤表面预处理;②渗透室压力由“马里奥特”供水系统调节;③土壤表面压力可以在零和任何负压间调节,直到土壤起泡点;④土壤表面压力及起泡点可以通过U形管压力计直接测量出来,且精度达到1mm;⑤导水率的计算基于Wooding平衡方程,且结果可以用图表和图形的方式表达。

通常,土壤水文性质通过实测法测定,即野外原位采样后进行实验分析测定而得。实测法均为点尺度测量,无法获得大尺度上土壤水文性质的空间分布信息。遥感方法则可获取从局地尺度到大尺度上土壤水文性质的空间分布信息,包括土壤水分特征曲线参数与土壤水力属性。但是遥感方法仅能观测表层(0~5cm)土壤属性,且其测量精度受多种因素控制,具有局限性,有待原位观测数据的验证(Mohanty, 2013)。此外,还可通过模型反演获取土壤水文性质,如土壤水分特征曲线与土壤水力属性等的空间分布(Qu et al., 2015)。

2. 尺度拓展研究

土壤水文性质尺度拓展是指利用某一尺度上所获得的土壤水文性质信息和知识来推测其他更大或更小尺度上土壤水文性质的过程(赵文武等, 2002; Liu and Weng, 2009;

Nelson and Cook, 2007; Manson, 2008)。尺度拓展包括升尺度和降尺度, 升尺度是指将小尺度的信息推绎到大尺度上的过程, 而降尺度则是将大尺度上的信息推绎到小尺度上的过程 (Wu and Qi, 2000; Zurlini et al., 2006; 孙庆先等, 2007; 邬建国, 2007)。在尺度拓展过程中, 土壤、地形、植被及气象因素都会对土壤水文性质的拓展结果产生影响 (Reynolds, 1970; Sharma and Luxmoore, 1979; Loague, 1992; Charpentier and Groffman, 1992; Rodriguez-Iturbe et al., 1999; Mohanty and Skaggs, 2001)。

1) 影响因素

地形是影响土壤水文性质空间分布的主要因子之一 (Raghubanshi, 1992; Chen et al., 1997; Burke et al., 1999; Baggaley et al., 2009; Wang et al., 2012; Sur et al., 2013; Zhu and Lin, 2011)。地形因子主要包括坡度、坡向、坡形、上坡贡献区域, 以及相对高程。研究表明, 土壤有机碳、土壤总氮、土壤水力等属性均受坡度、坡向、坡位的影响, 呈现出不同的分布规律 (Wang et al., 2001a, 2001b; Jarvis et al., 2013; Price et al., 2010; Tian et al., 2017; Seibert et al., 2007)。坡度影响水分下渗、排水状况及径流过程 (Famiglietti et al., 1998; Gómez-Plaza et al., 2001), 因而改变土壤水文性质的空间分布。坡度陡的地区水分下渗量少、排水条件好, 因而不利于降雨入渗的产生, 但利于径流的产生 (Famiglietti et al., 1998)。同时, 坡度陡的地区由于水分流失大, 往往水分含量低, 而坡度缓的地区则由于土壤水分的长期积累, 其水分含量较高。通常土壤水分随着坡度的增加而减少 (Moore et al., 1988; Qiu et al., 2001)。在坡面尺度上, 由于坡向不同, 土壤水分会存在差异 (Ridolfi et al., 2003; Moore et al., 1988)。坡向主要是通过影响太阳辐射和降雨分布 (Bi et al., 2010), 来影响土壤水分的空间分布。一般来说, 北坡土壤水分比南坡高 (Qiu et al., 2001; Wang et al., 2001a; 赵琛等, 2014)。相对高程常与其他影响因子, 如土壤物理性质、地形属性等相关 (Famiglietti et al., 1998), 从而影响土壤水分的空间分布。随着相对高程的增加, 土壤水分降低 (Qiu et al., 2001)。

土壤物理性质, 如土壤质地、结构、容重、有机质含量和孔隙度等, 还有受到这些因素影响的土壤水文性质, 均对土壤水分空间分布有较大影响。受土壤颗粒大小和孔隙度的影响, 以及它们对土壤水文过程的影响, 土壤水分可能会在很小的范围内表现出明显的空间差异 (Crow et al., 2012)。在非常湿润的条件下, 土壤水分变异性主要受到渗透系数及孔隙度的影响 (Vereecken et al., 2007)。因而, 土壤物理性质是影响土壤水分空间异质性的重要因子 (Vereecken et al., 2007)。

地表覆被状况对于理解土壤水文性质的空间分布也十分重要, 不同的地表覆被状况能够直接影响土壤水文过程。与地形和土壤因子相比, 植被对土壤水分空间异质性的影响更加动态化 (Crow et al., 2012), 一方面可通过根系提水影响入渗、蒸散发等, 从而直接影响土壤水分的空间分布 (Fernande-Illescas et al., 2001)。另一方面, 地表覆被状况也会改变土壤孔隙结构、土壤性质等特征, 进而影响土壤水文性质 (Tian et al., 2017)。例如, 与草地和裸地相比, 林地一般较为疏松, 富含有机质, 质地较轻。因此, 林地容重较小, 非毛管孔隙较多, 有效储水量较大。同时, 根系的存在, 改善了土壤结构 (Gyssels et al., 2005), 导致林地一般具有较高的入渗能力 (Rienznner and Gandolfi, 2014; Tian et

al., 2017)。普遍认为, 在相对潮湿的土壤条件下, 由于不受限制的植被根系提水, 土壤水分变异性较大; 而在相对干旱的土壤条件下, 由于植被能够从较湿润的土壤提取水分, 土壤水分变异性较小 (Bouten et al., 1992; Ivanov et al., 2010)。

气象因子, 主要是太阳辐射、风速、降水和湿度的变化均会影响到土壤水文性质, 尤其是土壤水分的空间分布。其中, 降雨是对土壤水分空间分布影响最大的气象要素 (Crow et al., 2012)。Sivapalan 等 (1987) 通过研究径流的主要形成机理发现, 径流形成的机理受到降雨的特征, 以及前期土壤水分状况导致的土壤水分空间异质性的影响。同样的, Salvucci (2001) 在美国伊利诺伊州的研究表明, 降水量与土壤水分、径流及蒸散发密切相关。

2) 尺度拓展方法

基于野外实地观测获取的土壤水文数据, 利用数学统计方法得到区域土壤水文性质是当前可行且有效的尺度拓展方法 (Chen et al., 2016)。目前, 通过发现空间上不同位置间的联系, 建立起不同观测站点上土壤水文性质的半变异函数, 是重要的土壤水文性质升尺度算法 (Vinnikov et al., 1999)。此外, 反距离加权法 (Lu and Wong, 2008)、简单克里金方法 (Pokhrel et al., 2013)、残差克里金方法 (Wu and Li, 2013) 及协同克里金方法 (Aznar et al., 2013; Liang et al., 2016) 也被广泛应用于土壤水文性质的尺度拓展。但是, 此类方法的性能很大程度上依赖于采样数据的质量。同时, 由于方法自身的特性, 即使是同一种方法, 在不同区域对不同土壤水文性质的拟合效果也不相同, 从而加大了此类方法的应用难度。

土壤转换函数 (pedotransfer functions, PTFs) 也是对土壤水文性质进行尺度拓展的重要方法 (Sharma et al., 2006)。该方法利用易于获取的属性, 如土壤、植被与地形等, 对难以获取的土壤水文性质进行尺度拓展 (Jana and Mohanty, 2012; Mohanty, 2013)。Jana 等 (2007, 2008) 使用人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 及改进的 ANN 方法进一步将 PTFs 方法应用于拓展不同尺度的数据。Brus 等 (2016) 基于 5 种环境指数与土壤有机质的关系, 对土壤有机质进行尺度拓展, 建立了祁连山区的土壤有机质数据库。Dai 等 (2013) 则基于 PTFs 方法建立了适用于中国地区的土壤水力参数库及土壤水分特征曲线参数库, 用以进行陆面过程模型模拟。

近年来, 遥感方法也被越来越多地应用于获取大区域的土壤水文性质。通过遥感方法获取亮温值, 研究其与土壤水力属性的关系, 从而获得大尺度土壤水力属性、土壤颗粒、土壤容重及其他土壤水文参数的空间分布, 进而与实地监测对比研究, 进行尺度拓展 (Joseph et al., 2008; Lambot et al., 2009; Moradkhani and Weihermüller, 2011; Santanello et al., 2007; Gutmann and Small, 2010; Mohanty, 2013)。遥感技术可以提供详尽的全球表层土壤水分数据。过去几十年中, 一系列遥感土壤水分产品被开发出来 (Beven and Kirkby, 1979)。例如, AMSR-E、ERS/ASCAT、SMOS 及 SMAP (soil moisture active passive) 等。但是, 这些产品大多时间分辨率为 2~3 天, 空间分辨率也较粗。另外, 由于是反演结果, 此类产品的数据精度也有待验证。

此外, 陆面过程模型也被广泛应用于土壤水文性质的尺度拓展, 尤其是大区域土壤

水分的估算中。例如, Yang 等 (2016) 利用 SHAW (simultaneous heat and water) 模型, 结合 PSO (particle swarm optimization) 算法, 提升了在半干旱区对土壤含水量的预测精度。Crow 等 (2005) 利用分布式陆面过程模型对土壤含水量进行了尺度拓展计算。结果显示, 通过模型模拟的结果发现, 土壤含水量在田间尺度上的异质性有了明显的提升。Loew 和 Mauser (2008) 用陆面过程模型, 基于遥感土壤水分反演土壤水文性质来提高模型模拟精度。结果表明, 参数反演依赖于表层土壤水分的观测。Gutmann 和 Small (2010) 则使用 Noah 陆面过程模型, 研究了全球不同植被覆盖及气候背景下模型反演土壤水文性质的效果及不同土壤水文性质的敏感性。

近年来, 利用数据同化来提高土壤水文性质的预测精度成为一种新兴的技术手段。一般土壤水文性质同化方法包括直接插入、逐步订正、优化插值、卡尔曼滤波及其派生算法、变分约束和粒子滤波等 (兰鑫宇等, 2015)。Entekhabi 等 (1994) 将微波遥感数据与陆面过程模型的数据进行同化, 利用扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 反演了土壤水分, 结果证明, 这种数据同化方法能够提高土壤含水量的预测精度。Reichle 等 (2008) 在阿肯色河流域通过利用自适应集合卡尔曼滤波来同化表层土壤含水量数据。结果表明, 自适应滤波器可确定模型及观测的误差, 相对于非自适应系统可提高同化的预测结果。

1.3 土壤水文异质性对水文过程的影响

土壤水文性质是土壤水运动、入渗、蒸散发、径流等水文过程计算及模拟的重要影响因子与基本输入参数, 其属性值的准确测定或推算是研究水文过程的前提 (Lin, 2009; McDonnell and Beven, 2014; Jin et al., 2015; Vereecken et al., 2015)。然而, 由于土壤水文性质, 尤其是关键性质获取困难且费时费力, 无法准确描述土壤水文性质的空间分布, 导致水文研究通常忽略了土壤水文参数的空间异质性对水文过程的影响。随着土壤转换函数、概率分布函数等方法的出现, 尤其是 Rosetta 等方法的应用 (Bouma, 1989; Schaap et al., 2001; Rubio et al., 2008), 将难获取的土壤水文性质与简单易获取的土壤属性联系起来, 使得大范围土壤水文性质的获取变得可行, 从而导致大尺度水文研究中广泛考虑土壤水文性质空间异质性对水文过程的影响 (Soet and Stricker, 2003; Temme et al., 2012)。

水文模型是分析土壤水文性质空间异质性对水文过程影响的有力工具及手段。集总式水文模型以单一或集总的参数形式来表达流域的空间特征, 如 Stanford 模型、HBV 模型、Sacramento 模型 (Bras, 1990; Kokkonen and Jakeman, 2001; Merritt et al., 2003; 芮孝芳和黄国如, 2004; Tague, 2005; He and Croley, 2007a; 徐宗学, 2009; Diek et al., 2014)。这种模型一般只能用于模拟气候和下垫面因子空间分布均匀的虚拟状态, 只能给出时空分布均匀化后的模拟结果, 不能全面反映相互联系的各个水文过程。分布式水文模型则可以满足上述需求, 其已成为分析土壤水文性质空间异质性对水文过程影响的有力工具 (Croley and He, 2005; He and Croley, 2007b)。目前, 常用的分布式水文模型包括 SWAT (soil and water assessment tool) 和 DLBRM (distributed large basin runoff

model) 等。

SWAT 模型广泛应用于径流模拟、非点源污染模拟、农业灌溉、土壤侵蚀模拟、气候变化水文效应分析等方面 (Arnold et al., 1998; Srinivasan et al., 2010)。SWAT 模型将流域划分成多个子流域, 子流域内依据土地利用、土壤类型和坡度生成水文响应单元 (hydrological response unit, HRU), 涉及的土壤水文性质包括土层深度、土壤质地、容重、有机质含量、饱和导水率和土壤有效持水量等。该模型可体现水文响应单元之间的土壤水文性质差异, 所以可在流域尺度上评价和分析土壤水文性质空间异质性对水文过程的影响。

DLBRM 模型可用于大尺度长序列水文过程的连续模拟 (Croley and He, 2005; He and Croley, 2007a), 其已在北美五大湖地区 40 多个流域及其他国家得到广泛应用, 在黑河流域中上游进行了初步应用并取得合理结果 (Croley and He, 2005; He and Croley, 2007a; He et al., 2009)。该模型在研究流域网格化的基础上, 考虑上层土壤、下层土壤、地下水和地表水之间的交互作用, 并将水文过程从上游向下游传递积累到河口, 完成产流和汇流模拟。该模型涉及的土壤水文性质包括土层深度、土壤质地、饱和导水率和土壤有效持水量等。DLBRM 模型已在黑河流域积累了应用经验, 本书中将其进行修订与改进, 增强其反映黑河上游土壤水文性质空间异质性及其水文效应的能力。

目前, 许多研究者将影响水文过程的关键土壤水文性质加入水文模型中, 用来研究土壤水文异质性对水文过程的影响, 并显著提高水文模型的模拟精度。Diek 等 (2014) 在 Rocky 山区用 SWAP 模型综合评价了土壤水力属性、地形参数、土壤深度等对流域水文过程的影响。Jin 等 (2015) 在中国西北黑河流域用 SWAT 模型评价了饱和导水率的空间异质性对流域水文过程的影响。Mekonnen 等 (2016) 则将水储量的空间异质性加入 SWAT 模型, 从而提高其在平原地区的模拟精度。现阶段需要考虑土壤水文性质的异质性及其影响, 开发基于水文过程空间异质性的水文模型, 将原有分布式水文模型子网格或 HRU 内水文过程异质性表达出来, 从而提高模型模拟精度 (Niu et al., 2014; Kitanidis, 2015; Vereecken et al., 2015; Kreye and Meon, 2016)。Nijzink 等 (2016) 将基于地形驱动的子网格水文过程异质性融入分布式水文模型 (The mesoscale hydrologic model, MHM) 中, 来提高流域水文模拟精度。Qu 等 (2015) 基于模型反演与观测数据, 用 Hydrus 模型研究了土壤水文性质的空间异质性对土壤水分运动的影响。Niu 等 (2014) 基于 LEO 实验, 用 CATHY 模型模拟坡面径流的形成过程, 结果表明, 考虑了土壤异质性的水文模型能够减少模拟误差, 能得到最好的模拟效果。综上所述, 水文模型能够用于反映土壤水文性质空间变异对流域水文过程的影响。

总的来说, 当前土壤水文异质性对水文过程的影响研究思路如下: ①通过在样点、样带尺度上的土壤采样测定、原位观测及尺度拓展, 综合分析土壤水文性质的空间异质性; ②在流域尺度进行水文过程模拟, 通过敏感性分析、情景设置等方法, 确定不同尺度上影响土壤含水量、径流量、入渗量及蒸散量等水文过程的主要土壤水文性质; ③在阐明土壤水文性质的空间异质性、水文过程的空间分布和动态变化规律, 以及水文过程与土壤水文性质相关性的基础上, 揭示土壤水文性质的空间异质性对水文过程的影响机制。