

基于引黄灌区土地变化的 可持续性评价研究

张鹏岩 秦明周 著

非
外
借



科学出版社

基于引黄灌区土地变化的 可持续性评价研究

张鹏岩 秦明周 著

地理学河南省优势学科重点建设学科

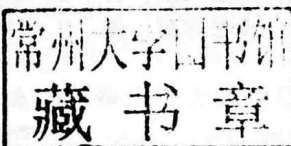
国家自然科学基金项目(编号: 41601175, 41171439)

河南省高校科技创新团队支持计划资助(编号: 16IRTSTHN012)

共同资助

河南省高校环境与健康工程研究技术中心

河南大学农业与农村可持续发展研究所



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要研究引黄自流灌区土地变化特征及其可持续性。以黑岗口、柳园口灌区为研究对象,分析了引黄灌区土地变化的时空分异独特过程和特点。并应用化学分析、GIS 技术和数理统计分析方法,分析了研究区内土壤重金属的含量、分布、类型、污染,以及积累特征,总结了引黄灌溉自流灌区内土地变化对土壤重金属污染的影响规律,提炼了灌区土地利用功能特征,对灌区未来土地利用变化、重金属含量和分布进行了模拟与预测。本书探索了土地利用功能分类及其相互作用,拓展了土地变化和土壤重金属污染的耦合分析,构建了引黄灌区独有的多功能土地利用分类体系与可持续性评价模型,对于引黄灌区土地利用与管理具有一定的指导意义和价值。

本书可作为土地资源管理、自然资源利用与保护、人文地理与城乡规划、自然地理与资源环境、农业经济管理,以及其他相关专业教材和参考书,也可以供相关学科理论和实际工作者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

基于引黄灌区土地变化的可持续性评价研究/张鹏岩,秦明周著. —北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058544-8

I. ①基… II. ①张… ②秦… III. ①黄河—灌区—土地利用—研究
②黄河—灌区—土壤污染—重金属污染—研究 IV. ①F321.1 ②X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 187512 号

责任编辑:杨帅英 李 静/责任校对:李 影
责任印制:张 伟/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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张:11

字数:258 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国是一个农业大国，又是一个灌溉大国，特殊的气候、地理、社会条件决定了我国农业必须走灌溉农业的发展道路，因此灌区在我国的历史和社会经济发展进程中一直占有重要地位。农业是国民经济的基础。我国的农业有赖于灌溉的发展，全国大部分商品粮食是由国有大中型灌区提供的。灌区作为我国商品粮生产基地，支撑我国农业和农村经济增长，灌区内农业生产比较稳定，作为我国粮食和农副产品生产的主要基地，在维持粮食安全、影响我国农业发展、农村经济繁荣和农民增收方面具有重要意义，是我国粮食安全的重要保障。

黄河下游灌区是我国最大的连片自流灌区，研究区位于黑岗口和柳园口灌区的最北端，靠近黄河区域，河道为悬河段，对灌区地下水补充(侧渗)作用明显，多为原背河洼地(湿地)转变而来，引水泥沙含量高，大量泥沙入田灌淤、改土，被灌区完全利用，土地盐碱化依然存在，土地质量参差不齐，土壤污染显现。

由于特殊的地质地貌、母质、气候和不合理的灌溉等诸多因素的影响，因此土壤环境质量下降现象非常严重，已成为农业生产新的障碍因子，灌区土地利用方式和土壤的可持续利用已引起人们的关注。面对灌区这种比较特殊的区域类型，人们更多关注的是节水灌溉及水利发展问题，忽视了灌区对水资源需求最大的是各类土地，而土地变化直接影响着对灌区的水资源分配、需求和水质，同样也影响着土壤环境质量。分析灌区土地利用变化的数量、类别和驱动力因素，有助于推动土地利用变化研究向着更广泛的领域深入，对于研究灌区土地变化时空分异规律和实现区域土地变化的可持续性具有积极意义。

本书开展下游引黄自流灌区土地变化特征和土壤重金属研究，重点探讨灌区土地变化和重金属的时空分异，研究下游引黄灌区特殊地理环境下土地变化的可持续性过程。引入多功能土地利用理论，揭示灌区土地变化和土壤重金属污染对灌区可持续性的影响，特别是评估灌区土地变化的可持续性评价，为引黄灌区土地变化提供新方向和新模式。

由于水平有限，本书还有许多尚需完善的地方，不妥之处，恳请各位专家学者进行批评指正，并提出宝贵建议。

作 者

2017年12月于河南开封

摘 要

本书以黑岗口、柳园口灌区为研究对象,以具有代表性的临近黄河四乡为研究区,研究了1988年、2001年和2011年研究区土地变化时空分异的独特过程 and 特点。应用化学分析、GIS技术和数理统计分析方法,分析了引黄灌区内土壤重金属的含量、分布、类型、污染,以及积累特征;探讨了土壤重金属污染因素;总结了引黄灌溉自流灌区内土地变化对土壤重金属污染的影响规律;提炼了灌区土地利用功能特征,对灌区未来土地利用变化、重金属含量和分布进行了模拟与预测;探索了土地利用功能分类及其相互作用;进行了土地变化和土壤重金属污染的耦合分析;构建了引黄灌区独有的多功能土地利用分类体系与可持续性评价模型;论证了引黄灌区土地变化的可持续性。研究主要结论如下:

(1)研究区土地变化明显。本书选取研究区1988年、2001年和2011年三期遥感影像,并获取其土地利用变化信息,经过解译、计算和分析得出,研究区边缘区城镇化过程明显、人为影响显著。城镇建设用地通过占用农用地而扩展,非城镇建设用地间土地利用结构变化明显。农用地、滩涂、水域面积减少,城镇建设用地、工矿用地有面积增加的态势。总量面积变化较大的土地利用类型有农用地、农村居民点;其次是城镇建设用地、水域和滩涂;工矿用地变化量相对较小。各土地类型间转入、转出频繁。城镇建设用地面积总量相对变化幅度较大,动态度最大,变化量和速度均较大,区域土地利用综合程度指数有一定增长,表明23年间研究区内城市化过程明显,尤其是研究区南部靠近城市边缘区域,非农化程度很高,建设用地的增长速度明显高于距其较远的地区。对比农用地和建设用地的动态度可以发现,农用地流失快的地方基本上为建设用地增长快的地方,而农用地流失慢的地方建设用地增长速度也较慢,二者在空间上存在明显的相关性,体现了建设用地扩展的主要来源是对农用地的占用。并应用马尔可夫模型对研究区未来土地利用变化进行预测,结果发现研究区未来40年里,农用地面积将持续减少,滩涂面积也将小幅度减少;城镇建设用地面积将持续增加,继续向研究区北部和西部扩展,水域和工矿用地有小幅度增加,总体趋势以建设用地的空间扩张、农用地的流失为特征。

(2)本书以Landsat TM/ETM数据、气象资料和其他地面野外调查资料为数据源,在遥感和地理信息系统软件支持下,采用单窗算法反演研究区地表温度,探索了研究区土地类型对地表温度分布的影响,得出各土地利用类型对应的地表温度有明显差异。结果证明水域和植被覆盖较多的地区温度较低,而裸露的建设用地聚集区地表温度较高。该区域的热环境格局与植被覆盖呈正相关,水域对研究区有明显的降温效应。水域类型自身的温度与其连接度呈负相关,随着水域类型的减温,地表有明显升温趋势。

(3)重金属污染程度反映出土地变化过程中所引起的区域土地质量变化。由研究区土壤重金属含量统计分析得出,研究区土壤重金属元素变异系数排序为: $Hg > Cr > Cd >$

$\text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Zn}$ 。利用 K-S 进行土壤重金属含量正态分布检验,各元素均符合正态分布。研究发现 Cd 存在极大值和离群值, Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 存在离群值, As 和 Hg 尚未存在离群值。在 ArcGIS 平台上分析了研究区土壤重金属含量空间分布趋势,得出研究区南部和西南部重金属含量较高。研究区域内 8 种重金属的理论变异函数拟合效果均较好,其中 Cr、Zn、As 符合球状模型, Ni、Cu、Cd、Pb、Hg 符合高斯模型。研究区域内土壤重金属受人为活动与区域因素的共同影响,其中人为活动对 Hg、Cd 的空间分布结构影响较为突出。通过内梅罗指数、地累积指数、污染负荷指数评价,得到 Hg、Cd 是整个研究区主要的重金属污染元素。采用单因子污染指数法得出 Hg 和 Cd 在一定程度上超出了河南省潮土背景值;地累积指数法得出研究区土壤中 8 种重金属均有一定程度的累积污染;污染负荷指数评价得出研究区土壤中重金属的污染状况整体上属于中等污染。而潜在生态风险评价得出研究区 Hg、Pb、As、Cd 均存在生态危害,以 Hg 和 Cd 最为严重。同时 GIS 软件提供了强大的分析功能,能够对污染区域的面积进行精确统计。单因子污染指数、地累积指数和潜在生态危害指数污染评价结果显示出不尽相同的污染分布,单因子污染指数结果所显示的污染区域明显大于地累积指数和潜在生态危害指数的结果。在土壤重金属人为污染评价结果的基础上,进行污染的影响因素分析,认为交通是造成污染的主要原因,水域作为污染传播的一个载体也是造成大面积连续污染的原因之一。

(4)应用土壤重金属情景预测模型,比照 2011 年土壤重金属含量平均值和污染面积,分别预测了 2021 年研究区土壤中 8 种重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg、As)含量、污染面积及分布趋势。结果表明研究区内各土壤重金属含量及污染面积在乐观、无突变和悲观三种情景下所预测的结果存在显著差别,不同情景背景下土壤重金属含量和分布有较大差异。其中 8 种重金属在乐观情景下含量明显下降,土壤污染面积减少;而在无突变情景和悲观情景下 8 种重金属含量表现为不断增加,土壤污染面积也不断扩大,同时,该两项在悲观情景下又明显比在无突变情景下要高。

(5)根据土地变化的可持续性评价模型,建立灌区可持续性评价指标体系,选取能全面、系统地反映出评价对象的指标,应用层次分析法和加权综合分析法,在 ArcGIS 9.3 环境下,通过图层叠加、栅格计算,应用综合评价模型进行图像空间运算,得出 1988 年、2001 年、2011 年三个时期的可持续等级发展水平,生成灌区可持续发展综合指数分布图。研究区三个时期的可持续水平较高,处于基本可持续与全面可持续水平。从区域可持续水平等级结构来看,研究区可持续状况以基本可持续和全面可持续为主,基本可持续和全面可持续水平面积逐渐增长;不可持续水平面积逐步减少。从空间分布上看,三个时期的可持续水平等级分布趋势大致相同,即由北向南逐级递减。全面可持续区域主要分布在研究区北部的农用地、滩涂和水域;靠近城市的研究区南部三个时期的可持续发展水平比较低,主要分布在城镇建设用地范围内。从时间动态上看,研究区可持续水平趋向好的方向。

关键词:土地变化;土壤重金属污染;可持续性评价;引黄灌区

目 录

前言

摘要

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	4
1.2 研究综述	5
1.2.1 土地变化对全球变化的意义	5
1.2.2 土地变化是可持续性科学的主题	6
1.2.3 土地变化对土壤质量的影响	7
1.2.4 我国土地变化科学的研究重点	12
1.3 研究思路和组织结构	13
1.3.1 研究思路	13
1.3.2 组织结构	14
1.4 研究方法和技术路线	15
1.4.1 研究方法	15
1.4.2 技术路线	15
第 2 章 研究区选择与概况	17
2.1 开封引黄灌区概况	17
2.1.1 基本情况	18
2.1.2 引黄的优势与地位	18
2.1.3 开封引黄灌区的发展历程	19
2.2 研究区概况	20
2.2.1 地形、地貌	21
2.2.2 气候	22
2.2.3 水文	23
2.2.4 自然灾害	24
2.3 灌区目前存在的问题	25
第 3 章 研究内容与数据收集	27
3.1 研究内容	27
3.2 数据采集与处理	27
3.2.1 气象数据	27
3.2.2 遥感数据	28
3.2.3 土壤数据	40

第4章 土地利用变化特征及预测	42
4.1 研究方法	42
4.1.1 GIS方法提取数据	42
4.1.2 土地利用矩阵分析	42
4.2 动态变化模型分析	47
4.2.1 土地资源数量变化模型	47
4.2.2 土地利用程度变化模型	50
4.3 基于马尔可夫模型的土地利用变化预测	51
4.3.1 马尔可夫模型原理及概述	51
4.3.2 预测数据处理	53
4.3.3 初始状态矩阵及土地利用转移概率的确定	54
4.3.4 模型的检验	55
4.3.5 模型预测	56
4.4 小结	58
第5章 研究区地表温度反演	60
5.1 地表温度反演的理论基础	60
5.1.1 地表温度概念	60
5.1.2 Landsat简介	60
5.1.3 温度反演算法的选择	61
5.2 地表温度反演过程	63
5.2.1 大气平均作用温度	63
5.2.2 大气透射率计算	64
5.2.3 地表比辐射率计算	65
5.2.4 Landsat TM影像地表温度反演结果	67
5.3 地表温度反演的结果检验	68
5.4 小结	70
第6章 土地变化造成的土壤质量变化	71
6.1 地统计分析介绍	72
6.2 克里格法介绍	74
6.2.1 克里格理论基础	74
6.2.2 普通克里格原理	75
6.2.3 土壤重金属克里格法应用	77
6.3 重金属含量与空间分布特征研究	79
6.3.1 土壤重金属含量统计分析	79
6.3.2 离群值(异常值)识别	81
6.3.3 土壤重金属变异函数拟合	82
6.3.4 土壤重金属空间分布趋势分析	84
6.3.5 土壤重金属空间自相关性分析	86
6.3.6 土壤重金属空间分布影响因素分析	87
6.4 土壤重金属含量空间插值	88
6.5 小结	90

第 7 章 土壤重金属污染评价与影响因素分析	91
7.1 评价标准	91
7.2 土壤重金属污染指数评价	92
7.2.1 内梅罗指数法	92
7.2.2 地累积指数法	94
7.2.3 污染负荷指数法	94
7.3 研究区土壤重金属污染指数评价结果	95
7.3.1 内梅罗指数评价结果	95
7.3.2 地累积指数评价结果	95
7.3.3 污染负荷指数法评价结果	96
7.3.4 污染评价结果的克里格插值	96
7.4 土壤环境生态风险评估	100
7.4.1 潜在生态危害指数法	101
7.4.2 评价结果	101
7.5 基于 GIS 的土壤重金属污染影响因素分析	103
7.5.1 土壤重金属污染的主要来源	103
7.5.2 基于统计分析法的土壤重金属污染物影响因素解析	104
7.5.3 重金属污染影响因素的定量分析	107
7.5.4 影响因素分析结果	110
7.6 小结	111
第 8 章 土壤重金属含量和分布预测	113
8.1 土壤重金属含量预测方法与模型	113
8.1.1 土壤重金属预测模型	114
8.1.2 土壤重金属累积预测	114
8.2 研究区 2021 年土壤重金属含量预测结果	116
8.3 小结	123
第 9 章 引黄灌区土地变化的可持续性评价	124
9.1 评价原理与方法	125
9.1.1 评价原理	125
9.1.2 指标的选取	126
9.2 研究方法和评价标准	128
9.2.1 评价方法	128
9.2.2 评价标准	129
9.2.3 指标数据的标准化	129
9.3 权重的确定	130
9.3.1 构建层次结构模型	131
9.3.2 构建判断矩阵	131
9.3.3 专家填写判断矩阵	132
9.3.4 单目标指标权重的确定	132
9.3.5 一致性检验	133
9.3.6 总目标指标权重的确定	133

9.4 计算与结果分析	138
9.5 小结	141
第10章 结论与展望	143
10.1 主要结论	143
10.2 研究不足与展望	144
参考文献	146

第1章 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

“灌区”通常是指在一处或几处水源取水，由具备可靠水源和引、输、配水渠道系统及相应排水沟道独立、完善的灌溉排水系统所控制的范围及其灌排设施与管理组织组成，能按农作物的需求并考虑水资源和环境承载能力，提供灌溉排水服务的区域 (Silberstein et al., 1999; 朱瑶等, 2003)。根据我国水利行业的标准规定，控制面积在 20000hm² 以上的灌区为大型灌区，控制面积在 667~20000hm² 以上的灌区为中型灌区，控制面积在 667hm² 以下的为小型灌区。目前，我国有大型灌区 402 处、中型灌区 5200 多处、小型灌区 1000 多万处。我国大型灌区水资源开发利用状况不一，分布不均，黄河中下游灌区开发程度大(表 1-1)。未来几十年，我国人口多，耕地少，水资源分布不均的情况基本保持不变，日益加大的人口与资源压力使得灌溉农业道路和灌区地位、作用愈显重要(汪恕诚, 2002; 游黎, 2010)。灌区生产了大部分农产品，同时，也消费了大部分农业投入物，灌区的农业人口密度大，商品需求量大，生活消费量大，产品的商品率大(雷声隆, 1999; Elias and María, 2007)，是我国农业规模化生产和重要的商品粮、棉、油基地，是农民增收致富的重要保障，也是农业、农村乃至经济社会发展的重要基础设施。党中央、国务院高度重视以节水为中心的大型灌区续建配套与技术改造(唐仁健, 2009)。促进灌区农业结构、耕作方式和生产关系调整，改变传统的土地利用模式，加大力度整治土壤环境，提高灌区农业综合生产能力，推进灌区社会、经济和环境的全面可持续发展。

表 1-1 大型灌区水资源开发利用状况

分区	人均水资源 总量/(m ³ /人)	人均实际综合用 水量/(m ³ /人)	开发程度/%	污染程度指数	地下水占供水 比例/%	水资源压力 指数
东北	3163	1304	41	77	14	0.12
内陆河	4329	2836	66	168	9	0.65
黄河上中游	1402	905	65	37	10	0.58
黄河中下游	468	438	94	13	30	0.62
海河	807	556	69	11	20	0.62
淮河	732	505	69	15	7	0.57
长江中下游	1466	715	49	21	2	0
东南沿海	1676	635	38	9	2	0
西南	1037	431	42	18	3	0
全国	1313	722	55	20	9	

我国既是一个农业大国，又是一个灌溉大国，特殊的气候、地理、社会条件决定了我国必须走灌溉农业的发展道路，因此，灌区在我国的历史和社会经济发展进程中一直占有重要地位(翟浩辉，2004)。农业是国民经济的基础。我国的农业有赖于灌溉的发展，全国大部分商品粮食由国有大中型灌区提供(雷声隆，1999)。灌区作为我国商品粮生产基地，支撑我国农业和农村经济增长，灌区内农业生产比较稳定，作为我国粮食和农副产品生产的主要基地，在维持粮食安全、影响我国农业发展、农村经济繁荣和农民增收方面具有重要意义，是我国粮食安全的重要保障。

全球约 70%的河流和水源为农业、家用和工业所消耗，其中农业是目前世界上最大的用水部门(Shiklomanov，2000)。在许多发展中国家，90%以上选择取水灌溉(FAO，2005)。在干旱地区，灌溉是作物生产的前提条件。在半干旱和半湿润地区，灌溉的目的是增加产量，减轻干旱的影响。在一定的灌溉条件下，水田生产相比旱作农业平均收益率普遍较高(Bruinsma，2003)。我国作为一个人口大国，粮食问题始终是国内外关注的热点，而粮食危机是土地和水危机的直接反映。灌溉农业在我国有着悠久的历史，我国农业的可持续发展在很大程度上依赖于水资源的供给状况(陈昌春等，2004)。灌区的灌排设施能够有效抵御水旱灾害的侵袭，促进农业旱涝保收，因而是农业生产的基础保障(张启舜，2005)。灌区部分工程的施工使当地水资源合理调配有了一个好的开端，同时也标志着灌区土地资源向更合理利用的方向转变(郭佳，2011)。全世界灌溉面积已扩大到全球近 2.2 亿 hm^2 ，占耕地面积的 18%左右(Fischer et al.，2007)(表 1-2)。目前，我国 1.22 亿 hm^2 耕地中，灌溉面积为 0.58 亿 hm^2 ，占全国耕地面积的 48%，在这些灌溉土地上，生产了占全国总产量 75%的粮食和 90%以上的经济作物。随着人口的增长和生活水平的提高，未来对粮食总量和质量的需求不断提高，灌溉为保障我国农业生产、粮食安全及经济社会的稳定发展创造了条件，与此同时，扩大灌溉面积仍是我国粮食增产的重要措施(高鑫和李雪松，2008)。

表 1-2 世界部分国家耕地面积与灌溉面积

国家	耕地		灌溉面积	
	总面积/ 10^6hm^2	人均面积/ hm^2	总面积/ 10^6hm^2	占耕地面积/%
世界	1375.70	0.28	220.32	16.00
中国	122.40	0.09	58.22	48.00
加拿大	46.70	1.82	6.35	1.40
美国	187.87	0.78	18.10	9.60
苏联	227.80	0.81	19.95	8.80
法国	176.05	0.31	11.70	6.60
德国	11.96	0.22	4.86	4.10
英国	7.02	0.12	1.55	2.20

20 世纪 60 年代中后期以来，引黄灌区开始迅速发展，灌溉面积不断扩大，为我国农业生产发挥了巨大作用，但直至目前灌区重建轻管的问题仍然存在，引黄灌区的运行管理仍属粗放型(张亮和徐建新，2007)，灌区可持续发展状况不容乐观(郑重等，2010)。

随着人口增加,经济快速发展,城市化进程加快,土地资源日益短缺,灌区土地变化的合理性和可持续性显得非常重要(周璐红等,2011)。

灌区是与农业、农村和农民紧密相关的基础设施和管理组织。大部分灌区主要分布在当地经济发达地区,随着城乡经济的发展,灌区不仅担负着农田灌溉任务,而且还担负着向城镇生活和工矿企业供水的任务。非灌溉用水的增加使灌区成为当地经济和社会发展的命脉。因此,对灌区的管理将具有重要的现实意义(高鑫和李雪松,2008)。发达国家的灌区管理主要包括灌溉工程管理体制和工程投融资体制两个方面(钟玉秀,2002;毛广全,2000;刘润堂,2002;周晓花和程瓦,2002)。由于政府管理的灌溉工程资金不足,用水户对工程维护置身事外,工程设施老化和损坏现象严重,灌溉效率低下(周晓花和程瓦,2002;冯广志和谷丽雅,2000)。印度灌溉管理改革的研究发现,用水户协会成立后,供水量明显增加,供水可靠性也得到提高(许志芳和张泽良,2002;冯广志和谷丽雅,2000)。国外学者研究表明灌溉管理在水资源效率和土地资源的合理使用上有了显著提高(Filiz et al., 2008; Kloezen et al., 1997; Sergio and Pauln, 2004; 王金霞等, 2011)。

灌区土地资源充分的利用是水资源供需平衡的必要前提(郭佳,2011)。2009年我国通过了《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划(2009~2020年)》。对于这一规划能否实现,其中一个很重要的制约因素是灌溉用水能否支撑农业生产能力的增长和可持续发展(水利部,2009;王铮和郑一萍,2001)。灌区一般具有较为完善的水源、输配水和调节系统,这些系统构成了灌区所在地区和流域水资源配置的基本格局,提供经济社会发展的重要基础设施。灌溉水资源使农民增加作物产量,减少对降水模式的依赖(Tubiello, 2005)。引水灌溉在国内外都具有长期的发展历史,灌区水资源配置的理论与技术已具有较高的发展水平(周宗军和王延贵,2010),我国的农业正在向现代农业过渡,其中灌溉起了重要的作用。灌区改善了农业不利的自然禀赋条件,为推广应用各种先进农业技术、调整农业结构、促使农业高产、高效、优质,增加农民收入提供了基础条件,是农业生产、农村经济发展、农村社会进步的基本保障(翟浩辉,2004)。

我国灌溉面积在全部耕地面积中占有很高的比例,灌溉农业在我国占据着十分重要的位置(韩洪云和赵连阁,2001)。但是,灌溉农业的可持续发展已经受到水资源短缺的威胁。过去20多年,海河、黄河、淮河和辽河的地表径流分别减少了41%、15%、15%和9%(王铮和郑一萍,2001)。在农业灌溉方面,普遍存在效率低下的状况,我国农业灌溉水的利用系数平均为0.45,而在发达国家为0.7~0.8(俞双恩等,2004)。面对日益严峻的水资源短缺形势,黄河流域也积极推动灌溉管理改革。从20世纪90年代开始,黄河流域灌区的灌溉管理改革取得了很大进展(王金霞等,2005; Wang et al., 2005)。逐步推行灌溉工程节水与农业节水技术、管理节水技术的有机结合,形成了初步的配套技术,已取得了显著效益(石玉林和卢良恕,2001)。但灌区农民生产、生活用水依然紧张,纷纷转变土地利用模式,调整种植结构,灌区内打井数量不断增加,引黄水量逐年减少,使得灌区工程效益不能充分发挥,经济效益难以体现(孙广生等,2001)。由于近年来黄河流量较小,水闸引水不能满足灌区需求,造成大面积水田变成旱田(许生原,2010),土地利用变化问题成为灌区的主要问题之一。

灌区是一个良好的复合生态系统,它主要依靠自然环境提供的光、热、土壤资源(朱

瑶等, 2003)。经过长期建设, 灌区内已形成一个生物之间、生物与环境之间, 相互联系、相互制约、相互依存、协同进化、协调发展的复合生态系统, 对大生态系统的平衡和大环境的维持起到至关重要的作用(姜开鹏, 2005)。此外, 灌区还兼有维护植被、涵养水源、净化空气、减轻风沙威胁、维持土地面积、增加农业产量、抑制水土流失等方面的功能, 与农民生活、农业生产和农村建设紧密相关。引黄灌区面积由 1950 年的 80 万 hm^2 , 发展到目前的 753 万 hm^2 (孙广生等, 2001)。扩大的灌区面积带来了土地利用、土壤环境等问题, 影响灌区可持续发展, 直接关系着农业甚至整个地区的经济社会可持续发展, 这些问题严重影响到地区人口、资源、环境和经济的协调与永续发展(张银辉等, 2006)。

1.1.2 研究意义

黄河下游灌区是我国最大的连片自流灌区, 研究区位于黑岗口和柳园口灌区的最北端, 靠近黄河区域, 河道为悬河段, 对灌区地下水补充(侧渗)作用明显, 多为原背河洼地(湿地)转变而来, 引水泥沙含量高, 大量泥沙入田灌淤、改土, 被灌区完全利用, 土地盐碱化依然存在, 土地质量参差不齐, 土壤污染显现。

由于特殊的地质地貌、母质、气候和不合理的灌溉等诸多因素的影响, 土壤环境质量下降现象非常严重, 已成为农业生产新的障碍因子, 灌区土地利用方式和土壤的可持续利用已引起人们的关注。面对灌区这种比较特殊的区域类型, 人们更多关注的是节水灌溉及水利发展问题, 而忽视了灌区对水资源需求最大的是各类土地, 而土地变化直接影响着对灌区的水资源分配、需求和水质, 同样也影响着土壤环境质量。分析灌区土地利用变化的数量、类别和驱动力因素, 有助于推动土地利用变化研究向着更广泛的领域深入, 对于研究灌区土地变化时空分异规律和实现区域土地变化的可持续性具有积极意义。

研究区内土地类型并不复杂, 但时空变化较大。本书借助遥感(RS)、地理信息系统(GIS)技术定量分析研究区土地利用变化, 尝试应用土地利用变化预测模型, 阐明研究区土地利用变化规律及其未来变化趋势, 并深入研究由土地变化所引起的土壤重金属污染状况, 为实现研究区土地利用合理开发、土地利用结构合理调整、土壤环境的综合治理, 以及土地变化的可持续性评价提供科学依据。

本书运用先进的科学技术, 将 GIS、地统计学结合起来, 验证基于 GIS 的地统计学对于揭示研究区土壤重金属空间变异特征的有效性, 为地统计学在小尺度下的应用提供参考。事实上, GIS 具有较强的空间数据管理功能, 缺乏对一些问题的空间分析能力; 而地统计学则具有较强的空间分析功能, 但其空间数据管理功能较弱。二者的结合可以取长补短, 充分发挥各自的优势。另外, 通过土壤重金属污染评价模型对研究区土壤重金属含量和空间变异特征进行分析, 揭示了研究区土壤重金属的空间变异规律, 可以有效地指导农业生产, 并为土地利用规划和确定土地质量治理提供决策参考, 应用土地变化和土壤环境质量的机理分析为可持续性评价奠定基础。

研究引黄自流灌区土地变化特征及其可持续性, 在理论上, 不仅有助于揭示黄河水灌溉与灌区土地利用的相互关系, 也有助于探索局部(灌溉)土地变化(LC)对当地生态系统的影响, 符合地理学重视地表过程研究的趋势, 也符合国际上对土地利用/土地覆被变

化(LUCC)研究和重视对生态系统影响的转变。土地变化被视为综合人类与环境的耦合系统(Turner et al., 2007),符合深入开展综合、跨学科探索土地变化科学(land change science, LCS)、可持续性科学(SS)的趋势。在实践上,也可为灌区整改扩建、粮食安全生产提供决策参考。

1.2 研究综述

1.2.1 土地变化对全球变化的意义

土地变化是21世纪重要的科学议题之一(McMahon et al., 2005),是全球变化研究的重要课题和热点问题(李秀彬, 1996),对全球变化具有重要意义(Liu et al., 2005),是全球变化最直接、最重要的表现(史培军, 1997)。在全球环境变化研究中,以土地利用与土地覆被变化动态为核心的人类-环境耦合系统研究逐渐成为土地变化科学研究的新动向(刘纪远等, 2009)。土地变化及其影响成为全球变化与可持续发展研究中的热点问题,核心地位越发突显(Lambin et al., 2001)。

全球变化,是近年来国际科学联合理事会(ICSU)发动和组织国际超级科学计划(Pernetta et al., 1995)。在全球变化思想的形成过程中,国际科学界尤为关注人类活动究竟在多大程度上干扰着全球环境(DeFries and Silver, 1992),同时,集中于陆地表面的人类活动对环境变化的影响程度,在中小尺度上已超出自然因素的作用,成为主要影响因素(Turner et al., 1995; 李秀彬, 1996)。这对于研究地表径流与侵蚀、气候变化、生物多样性分布和生物地球化学循环等具有重要意义(于兴修, 2002)。

20世纪90年代初,全球变化研究计划(IGBP)和全球变化的人文因素研究计划(IHDP)推出LUCC科学研究计划,并将其作为全球变化研究的核心项目。研究发现,土地系统的变化主导了气候变化、生物多样性和生态系统服务、土地退化及人类-环境耦合系统的脆弱性等结果。认识这些变化的动力需要把土地覆被(生物自然条件)和土地利用(人类利用)视作耦合的人类-环境系统。经过众多学者的努力,产生了一门实际存在的土地变化科学(Rindfuss et al., 2004)。全球变化研究计划和全球变化的人文因素研究计划进入第二阶段后整合第一阶段土地利用/覆被变化和全球陆地生态系统变化(GCTE)两大核心项目而形成新的核心计划,并提出了“土地变化科学”的新范式(GLP, 2005; Rindfuss et al., 2004; Turner et al., 2007)。土地变化科学以“耦合的人类-自然系统”为对象(Liu et al., 2007),向着更加集成化、理论化和模型化的方向发展(石龙宇等, 2008),重点分析研究土地利用与覆盖变化的过程、原因、结果及效应等问题(Gutman et al., 2004; Rindfuss et al., 2004)。

2003年,IGBP提出了“土地变化科学的范式”、“土地变化科学——新的科学范式”及“土地变化科学”的三个研究焦点(Moran, 2003)。2004年,美国航空航天局(NASA)在汇总1996~2001年的研究项目时提出土地利用/土地覆被变化科学是真正的综合学科。出版了专著《土地变化科学:观察、监测与认识地表变化》,并指出:它日渐成为大型、跨学科的科学项目,并与其他NASA项目,如陆地生态学、陆地水文学、水循环、碳循

环和应用项目等关系密切。它代表了最先进的土地覆被研究成果(Garik et al., 2004)。该书汇集多名学者成果,分5部分共26章,第一次系统阐述了土地变化科学,标志着新学科——土地变化科学的正式诞生。Gutman等(2004)在前言中指出:LUCC科学是真正跨学科的科学,它需要自然科学、遥感与社会科学的整合,它开创了新的跨学科研究领域,形成了新的学科研究范式——综合的土地变化科学。

2005年,美国地调局(USGS)还将土地变化列为地理科学关键研究领域(Maria et al., 2011)。2007年,Turner、Eric和Lambin等发表《全球化及变化与可持续性的新兴科学——土地变化科学》论文,配之以其他5篇论文,在美国科学院院刊(PNAS)出版了“土地科学专辑”,系统总结了LCS的研究进展、主要成果,将土地变化科学总结为5个方面:土地特性观测与监测、土地变化耦合系统、生物物理影响与反馈、模型、综合与评估(Turner et al., 2007),可以视作LCS高层次“里程碑式”的科学建树。可见,土地变化科学已逐步发展为一门新兴学科,土地变化已成为当前重要的科学前沿之一,也是地理学尤其是自然地理学最重要的研究领域之一(路云阁等, 2006)。

土地变化之所以受到重视,因为它是人类活动与自然环境相互作用最直接的表现形式(刘纪远等, 2014),是全球变化最重要的驱动力(Foley et al., 2005)。当代对土地变化的重视起因于20世纪80年代,当时认为土地利用/覆被变化是全球碳循环的关键因素,土地利用变化通过向大气排放或吸收温室气体进而改变气候系统中的碳循环(Pielke et al., 2002)。土地利用变化是陆地生态系统碳源/汇估算中最不确定的因素(Ramankutty et al., 2007)。自20世纪90年代以来,土地利用/土地覆被变化问题引起国际组织和世界各国的普遍关注(李秀彬, 1996)。90年代,土地变化研究转向了增加或减少大气中碳对地表景观的改变和调整。而碳平衡研究,特别是解释所谓“丢失的碳”,重点指向了农田CO₂和施肥、废弃农田绿化等土地变化(Houghton, 1995; Kasimir-Klemetsson et al., 1997; Churkina et al., 2010)。从此,土地变化提升到全球变化的关键作用,而非通常说的基础作用,改变了陆地表层物质和能量循环过程,由它引发的生态系统变化也受到重视(Fu, 2003; Paeth et al., 2009)。国内外学者通过一些案例分析,分别从全球洲际、区域(流域)及地块等尺度,探讨了土地利用变化对全球气候变化、区域气候变化、痕量气体和温室气体排放的影响(Hansen et al., 2005; Bonan, 2008; Foley et al., 2005; Claussen et al., 2001; Marland et al., 2003; 张银辉等, 2005),认为土地利用/土地覆被变化是全球气候变化的重要驱动因素之一,在不同时间和空间尺度上发生快速变化,从而剧烈改变地表覆盖状态,增加地球表层生态系统的脆弱性。其不仅是一个简单的生物地球物理过程,还包括生物地球化学过程(Houghton and Hackler, 2003; GLP, 2005; IPCC, 2007; Feddema et al., 2005; Foley et al., 2005)因此,土地变化对气候变化与生态系统的影响及其互馈机理被列为全球变化研究的重要内容(刘纪远等, 2011),同时,新兴的可持续性科学也将土地变化作为核心内容(Turner et al., 2003, 2007)。

1.2.2 土地变化是可持续性科学的主题

1972年联合国人类环境会议在斯德哥尔摩召开,首次提出了可持续性的概念(Blackburn, 2007),LUCC研究正经历着从“全球到区域”和“自然到人文”的转变,区域LUCC

研究正成为当前研究的最新动向(Kamusoko and Aniva, 2009; Canora et al., 2008)。2001年, Kate 等在美国《科学》发表《可持续性科学》, 美国科学院 2002 年专设可持续性研究项目及网站, 2005 年在美国科学院院刊(PNAS)设立了可持续性科学部门, 2007 年邀请世界顶尖学者, 出版了《土地变化科学》《生态系统服务: 从理论到实施》等 5 个有关可持续性科学关键问题的专辑。面临 21 世纪人口猛增的担忧, 土地变化科学研究转向了对全球生态系统改变贡献最大的农业用地与粮食安全, 2010 年 2 月、4 月, 美国 PNAS 出版了两期粮食安全专刊。如何供养 90 亿人口成了严峻挑战(Godfray et al., 2010; Caroline and Jasny, 2010), 而土地变化中林地砍伐(退化)与灌溉是影响可持续性、粮食安全的重要因素(Turner et al., 2003, 2007)。有研究发现: 近 40 年全球粮食翻倍, 养活 60 亿人的关键是化肥使用、灌溉等土地利用方式(Wu et al., 2011; 余强毅等, 2011)。多数国家, 农业用水占全年水需求量的 70%~90% (Natasha, 2010; David et al., 2002)。因此, 农业可持续性最大的挑战是改革当前农业土地利用技术以提高粮食产量, 如节水灌溉、循环利用、提高水肥利用效率、增加作物多样性等, 减少农业对生态系统的影响(Godfray et al., 2010; Fedoroff et al., 2010; Jules, 2008)。

许多研究者用土地变化科学及可持续性科学的新理论, 从不同方面、不同尺度开展了科学研究。欧共体推出了 SENSOR 项目, 开发了可持续性影响评价工具(SIAT), 将全球经济与决策情景转化为土地利用变化(Katharina et al., 2008; Hendrike et al., 2011)。特别是构建的跨学科、创新型土地利用多功能(LUFs)概念及其定量综合可持续性影响评价(SIA)概念与模型(Maria et al., 2011)。LUFs 实质是不同土地利用提供的与经济、环境和社会最密切的服务与产品整合分类, 是社会经济与环境的三大可持续性评估(Marta et al., 2008)。土地利用变化必定伴随土壤变化, 土壤则是最关键且最重要的研究对象(Foley et al., 2011; Podmanicky et al., 2011)。在地方评估 SIA 时, 还应当吸收相关利益者(stakeholders)参与, Sandra 等(2011)认为: 土地功能多样性和人的社会角色(social actors)、土地利用决策的优先性、生态系统服务的联系是连接生态与社会的主要纽带, 采用基于矩阵的方法转换, 定量和整合社会生态信息, 调解社会角色间土地利用冲突, 实现可持续性。这些认识观念的研究与转变, 有机地将自然或生态系统为人类提供的福祉如生命支持系统、文化功能等难以理解的概念归化为客观的土地功能, 打破了人类与自然分割的藩篱。对土地变化研究, 也逐渐由对土壤质量变化、重金属污染等转向了节水、增粮和生态保护等(Mico, 2009)。在与全球变化联系时, 还发现了灌溉驱动的土地变化有致冷作用。随着研究的深入, 人类更加认识到此研究的实质是为进一步理性化的土地利用服务, 从微观、中观和宏观的空间尺度上探讨了土地利用演变(万荣荣和杨桂山, 2005), 对现实土地利用状况进行评估, 进一步预测未来土地变化方向, 提出合理的土地利用模式, 最终实现土地的可持续利用(Dube et al., 2009; 卞正富和张燕平, 2006)。

1.2.3 土地变化对土壤质量的影响

土地利用指土地的使用状况或土地的社会、经济属性(Turner et al., 1995), 它作为人类利用土地进行各种活动的综合反映(Turner et al., 2007), 与土壤重金属元素的分布有着密切联系。土地利用方式的变化会引起土壤质量的改变(李新宇等, 2004), 对水土