

学号 2014301110016

学院归档号 _____

武汉大学本科毕业论文

生物多样性热点区域 土地利用及生物量变化分析

院 系 名 称：资源与环境科学学院

专 业 名 称：土地资源管理

学 生 姓 名：周正梓

指 导 教 师：焦利民 教授

二〇一八年五月

郑 重 声 明

本人呈交的学位论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料真实可靠。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。本学位论文的知识产权归属于培养单位。

本人签名：_____ 日期： 2018.5

摘 要

划定生物多样性热点区域是保护生物多样性的重要手段，生物多样性热点区域不仅是生物多样性最丰富，生物多样性丧失最严重的区域，而且是城市化、战争等人类活动的热点区域。

本文以全球生物多样性热点区域为研究区域，基于多时相土地利用分类数据，进行土地利用变化分析。通过构建土地利用程度指数，从状态和过程两个方面，揭示了过去 20 年土地利用程度的时序变化与区域分异特征；通过构建生物量估算模型，模拟了各区域生物量变化过程，归纳生物量变化的模式；采用相关性分析方法分析了生物量变化速度与土地利用程度变化的相关性。经过上述研究，本文获得以下主要结论：

（1）1995-2015 年期间生物多样性热点区域土地利用程度逐年增加，各热点地区土地利用程度指数差异明显，其中东南亚区自然可再生用地丧失的幅度和速度均远大于其他地理分区。从土地利用程度变化速度来看，二十年间土地利用程度增加速度最快的区域是位于东南亚的巽他古陆，整体而言，各区域 1995-2005 年土地利用程度增长速度快于 2005-2015 年。

（2）1995-2015 年期间各热点区域生物量变化的模式可以归纳为三类，主要包括连续增加，连续减少与其他类型。生物量增加最快的区域为加勒比群岛，生物量减少最快的区域集中在东南亚地区与中东地区。

（3）人类土地利用活动对生物量变化影响显著。生物量变化速度与土地利用程度指数变化速度具有显著的负相关关系，相关系数为-0.69。生物量以增加模式变化的生物多样热点区域中土地利用变化与生物量变化的相关性强于生物量以减少模式变化的生物多样性热点区域，前者相关系数为-0.74，后者相关系数为-0.63。

关键词：土地利用变化；生物量减少；生物多样性热点区域；土地利用程度

ABSTRACT

The identification of biodiversity hotspots is an important means to protect biodiversity. The hot area of biodiversity is not only the most abundant biological diversity, the most serious area of biodiversity loss, but also a hot area of human activities such as urbanization and war.

Based on the global biodiversity hotspots, this paper analyses land use change based on multi temporal land use classification data. The following conclusions are drawn:

(1) The land use degree in the biodiversity hotspots increased year by year during the 1995-2015 years, and the land use degree of various hotspots was distinct, and the extent and speed of the loss of natural renewable land in Southeast Asia were far greater than those of other geographical areas. From the rate of land use, the fastest increasing rate of land use in twenty years is the Sundaland in Southeast Asia. Overall, the 1995-2005 year land use degree of each region is growing faster than 2005-2015 years.

(2) In 1995-2015 years, the patterns of biomass change in various hotspots can be classified into three categories, which mainly contain increase continuously and decrease continuously. The fastest growing area is the Caribbean , with the fastest biomass change in Southeast Asia and the Middle East.

(3) Human land use activities have a significant impact on biomass changes. There is a significant negative correlation between the rate of biomass change and the change rate of land use degree, and the correlation coefficient is -0.68. The correlation of land use change and biomass change is stronger than biomass to reduce the variation of biological diversity in biological diversity hotspots. The correlation coefficient of the former is -0.7, and the correlation coefficient is -0.34.

Key words: land use change; biodiversity reduction; biodiversity hotspots; land use degree

目 录

1 绪论

1.1 研究背景与意义.....	3
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 生物多样性热点区域的划定.....	4
1.2.2 生物多样性热点区域特征.....	5
1.2.3 土地利用/土地覆盖变化对生物多样性的影响.....	5
1.2.4 土地利用程度与人类干扰指数.....	5
1.3 研究目的与内容.....	6
1.4 研究思路.....	7

2 数据与方法

2.1 研究区概况.....	8
2.2 数据源选择.....	9
2.3 研究方法.....	11
2.3.1 变化过程测度方法.....	11
2.3.2 土地利用程度模型.....	11
2.3.3 生物量估测方法.....	12
2.3.3 地理分区.....	13
2.3.5 相关系数与显著性检验.....	13

3 热点区域土地利用变化分析

3.1 土地利用结构及其变化.....	15
3.2 土地利用程度的时序变化与区域分异.....	17
3.2.1 土地利用程度的时序变化.....	17
3.2.2 土地利用程度的区域分异.....	17
3.3 土地利用程度动态过程的时序变化与区域分异.....	18
3.3.1 土地利用程度变化速度的时序变化.....	18
3.3.2 土地利用程度变化速度的区域分异.....	19

4 热点区域土地利用变化与生物量变化关联分析

4.1 生物量变化过程.....	21
4.1.1 生物量变化过程模拟.....	21
4.1.2 生物量变化类别分析.....	23

4.2 生物量动态过程的时序变化与区域分异.....	24
4.2.1 生物量动态过程的时序变化.....	24
4.2.2 生物量动态过程的区域分异.....	24
4.3 生物量变化与土地利用程度变化关联分析.....	25
5 结论与展望	
5.1 结论.....	27
5.2 研究展望.....	27
参考文献	28
致谢	30

1 绪论

1.1 研究背景与意义

划定生物多样性热点区域是生物多样性保护的主要方式。保持生物多样性是维持生物圈（Biosphere）稳态与可持续发展的必要条件，也是人类赖以生存和发展的基本需求。然而，因为物种入侵导致的物种灭绝、温室效应导致的气候变化、生境丧失与生境破碎化对生态系统稳定性的影响，生物多样性受到严重威胁。保护生物多样性，与人类自身的生死存亡密切相关^[1]。随着全社会对环境问题的关注，生物多样性保护成为相关学科的研究热点，制定有效的保护措施对缓解生物多样性受到的威胁至关重要。由于在生物多样性保护过程中，资金、人力等客观条件是有限的，而生物多样性在不同多样性尺度（濒危物种多样性、当地物种多样性、总物种多样性）上的分布又具有较大差异^[2]，不同地域上受威胁程度和受威胁因素具有特异性，使得实现生物多样性保护的效益最大化成为生物多样性保护研究的核心问题。生物多样性热点区域的概念最早由 Myers 等人提出^[3]，指在全球范围内物种量较为丰富，且在过去的一段时间内损失了较多的生物多样性。依据这两条标准划定了全球生物多样性最丰富且受威胁最大的 25 个区域；之后，Mittermeier 等将生物多样性热点区域扩充到了 36 个^[4]。划定热点区域的模式已成为生物学界最为关注的保护方式，成为保护地理学重要的研究课题，也是保护国际组织（Conservation International, CI）所倡导的生物多样性保护方式。

生物多样性热点区域，不仅是生物多样性最丰富，生物多样性丧失最严重的区域，而且是战争、城市化等人类活动的热点区域。36 个生物多样性热点区域总面积接近地球表面积的 10%，其中陆地面积达到 2200 万平方公里，占地球陆地总面积的 14%，包括了全世界主要的热带雨林区域。丰富的资源与适宜的气候不仅孕育了全世界 60% 的生物，而且居住了超过 30% 的人口，成为近几十年来人类活动最为频繁的区域。有研究表明，在 1950–2000 的 50 年间，全球爆发的所有战争中，90% 涉及生物多样性热点区域中的国家，80% 直接发生在最早划定的 25 个生物多样性热点区域上^[5]；1990–2000 年间，25 个生物多样性热点区域的人口增长率为每年 1.9%，高于全球年均人口增长率（1.3%），也高于发展中国家年均人口增长率（1.6%）^[6]；2000 年左右，约 1% 的生物多样性热点区域的土地为城市，但预计到 2030 年，全球 34 个生物多样性热点区域内将有 2.8% 的土地被城市占用，热点区域内建设用地增速高于非热点区域^[7]。

生物多样性热点区域作为维持可持续发展，保持物种多样性的重要区域，探究其中的生物量等生物多样性特征变化情况，对掌握和认知生物多样性热点区域内生物多样性变化动态过程具有重要意义；对热点区域土地利用变化的研究，能帮助理解土地利用变化特征；定量分析土地覆盖变化导致的土地利用程度变化及其环境效应，能为土地利用提供决策支持，为区域内土地利用宏观政策调控提供参考依据；本文从生物多样性保护的视角出发研究土地利用变化，丰富了土地利用研究的理论方法。

1.2 国内外研究现状

关于该选题的研究主要包括以下几个方面：

1.2.1 生物多样性热点区域的划定

现有的生物多样性热点区域概念最初来自 Myers 提出的“环保主义”和“热点”，是指地球生物最富有和最濒危陆地生态区。生物多样性对维持生态系统的稳定至关重要，随着人类社会的发展，多样性的破坏十分严重。国际国内对生物多样性的保护工作非常重视，投入了大量的人力财力，然而投入的保护资源是有限的，不足以满足需求，因此生物多样性保护热点区域的确定具有重大意义，成为保护地理学的重要研究课题。

Myers 等认为确定为生物多样性热点区域需要满足两个要求：它必须包含至少 0.5% 或 1,500 种独有品种的维管束植物，并且它已失去了至少 70% 其原生植被^[3]。全球至少有 25 个地区符合这一项定义，另外还有九个候选的地区，2016 年区域数量增加到了 36 个。这些热点存活了全世界近 60% 的植物、鸟类、哺乳动物、爬行动物、两栖动物，具有非常高的特有物种占有率。Kareiva & Marvier 等指出现有的确定方法不足以代表其他形式的物种丰富度（例如，总体物种丰富度或濒危物种丰富度）^[8]；没有充分代表除了维管束植物以外的类别；所确定的热点地区经历了大量的栖息地丧失，但这并不意味着他们正在经历持续的栖息地丧失。另一方面，相对完整的地区（例如亚马逊河流域）的土地流失相对较少，但目前正以巨大的速度流失栖息地。Daru, Barnabas 等人认为现有确定方法没有充分考虑系统演化的多样性（phylogenetic diversity）^[9]。Orme C 等指出生物多样性在物种总量，濒危物种量，地方物种量三个尺度性上空间分布并不一致^[2]。

1.2.2 生物多样性热点区域特征

生物多样性热点区域,不仅是生物多样性最丰富,生物多样性丧失最严重的区域,而且是战争、城市化等人类活动的热点区域。36 个生物多样性热点区域总面积接近地球表面积的 10%,其中陆地面积达到 2200 万平方公里,占地球陆地总面积的 14%,包括了全世界主要的热带雨林区域。丰富的资源与适宜的气候不仅孕育了全世界 60%的生物,而且居住了超过 30%的人口,成为近几十年来人类活动最为频繁的区域。有研究表明,在 1950-2000 的 50 年间,全球爆发的所有战争中,90%涉及生物多样性热点区域中的国家,80%直接发生在最早划定的 25 个生物多样性热点区域上^[5];2000 年左右,约 1%的生物多样性热点区域的土地为城市,但预计到 2030 年,全球 34 个生物多样性热点区域内将有 2.8%的土地被城市占用,热点区域内建设用地增速高于非热点区域^[7];Richard 等人^[6]在对生物多样性热点区域人口密度与人口增速的研究中发现 1990-2000 年间,25 个生物多样性热点区域的人口增长率为每年 1.9%,高于全球年均人口增长率(1.3%),也高于发展中国家年均人口增长率(1.6%)。

1.2.3 土地利用/土地覆盖变化对生物多样性的影响

栖息地变化是导致物种栖息地破碎和丧失的主要原因,评估人类活动及其引起的环境变化对生物多样性的影响是当前的难点和热点。

国内外很多学者在土地利用覆盖变化对生态系统变化的影响方面进行了深入研究。Falucci 等通过对巴塞罗那大都市区 1960-2000 年土地利用变化的分析,对造成生态系统多样性变化的因素划分为城市化、栖息地丧失、耕地撂荒^[10]。Banou 等将在分析意大利 1956-2000 年土地利用空间格局的基础上讨论了其对生态系统多样性变化的影响,建议对林地和耕地加强保护^[11]。总体而言,从长时间序列分析土地利用变化对生物多样性的影响研究相对较少。

1.2.4 土地利用程度与人类干扰指数

土地利用程度评价主要采用两种计算方法,一是通过各地类土地利用程度分级指数计算,即刘纪远的土地利用程度综合指数模型,将区域土地利用类型归类到 4 级土地利用程度,并赋予分级指数^[12],该方法广泛运用于较大尺度的土地利用程度研究中。二是通过多个复合指标对土地利用程度进行计算,如曹瑞芬等、柯新利均选取土地垦殖率、土地农业利用率、耕地复种指数、林地覆盖率、养殖水面利用率、人口密度、土地建设利用率、土地利用度 8 个指标,分别对武汉市、咸宁市的土地开发利用程度进行评价。

尽管 Myers 等人提出了生物多样性热点区域的概念并划定了热点区域，但是生物多样性热点区域本身也是一个动态变化的过程。个别的栖息地可能因为在划定为生物多样性保护区域后，得到了有效保护或其生态系统本身适应性较强，在之后的一段时间内相比于其他地区生物多样性受威胁程度降低，使得其不再有成多样性保护区域的必要。而另一些区域由于人类活动加剧或气候变化，生物多样性丧失显著，应该予以重视并识别为生物多样性热点区域。

已有的生物多样性热点区域都具有相当丰度的物种量，即满足划分为热点区域的第一条标准。对于现有的生物多样性热点区域，生物多样性丧失程度可以作为其能否保持热点区域地位的评判标准。长久以来，小范围区域性的生物多样性的评估以实地调查和生物统计等为主要手段，对于大范围的生物多样性评估，已证明可以通过栖息地面积与物种多样性的关系计算大范围内物种多样性变化情况

[13]。

因此，栖息地丧失程度可以作为判断热点区域地位的评判标准。某一时间段内发生了较大比例的、持续的栖息地丧失的区域，生物多样性受威胁严重，应识别为热点区域。而对于在一段时间内栖息地并未明显丧失的区域，生物多样性受威胁的程度有所好转，不应继续识别为热点区域。栖息地变化特征可以作为生物多样性热点区域识别的标准。

1.3 研究目的与内容

论文旨在通过对热点区域土地利用变化动态过程的研究揭示：（1）生物多样性热点区域土地利用结构特征，了解和掌握热点区域土地利用程度时序变化过程与区域之间的分异性，识别土地利用变化最剧烈的区域。（2）模拟生物量变化特征，总结生物量变化模式；（3）综合生物量变化特征和土地利用变化特征，分析土地利用程度变化与生物多样性变化的相关性。

本研究具体内容可概括为以下两个部分：一是分析生物多样性热点区域土地利用变化特征；二是研究土地利用程度变化与生物量化的相关性。

文章的组织架构及具体章节安排如下：

第一章绪论。本章首先介绍了研究的背景及意义，指出在生物多样性愈发受到重视的全球背景下，划定生物多样性热点区域成为保护生物多样性的重要手段，且研究表明生物多样性热点区域也是人类活动的热点区域。研究生物多样性热点

区域的土地利用变化特征具有重要意义。回顾了现今生物多样性及土地利用变化研究现状，总结了研究的方法、思路及尚存在的不足。

第二章数据及方法。介绍了本次研究所选 36 个生物多样性热点区域的总体概况；实验数据的获取及预处理过程。介绍了用地类型变化速率的计算方法、大尺度生物量变化估测方法与依据、土地利用程度计算方法与依据。

第三章生物多样性热点区域土地利用变化特征分析。主要分析了土地利用结构，土地利用程度总体时序变化与区域分异，识别在生物多样性热点区域中的重点区域。

第四章生物多样性热点区域土地利用程度变化与生物量变化关联分析。计算模拟了生物量的动态变化过程，识别了生物量变化的模式。依模式对生物量变化与土地利用程度变化进行关联分析，探讨了土地利用程度变化的对生物量变化的影响特征。

第五章结论与展望总结了本文的主要结论并做出进一步讨论。

1.4 研究思路

结合研究目的，本文研究思路主要按照分析土地利用结构变化，土地利用程度的区域分异与时序变化，生物量变化的估测，生物量变化模式识别，生物量变化与土地利用程度变化关联分析进行。技术路线如图 1.1。

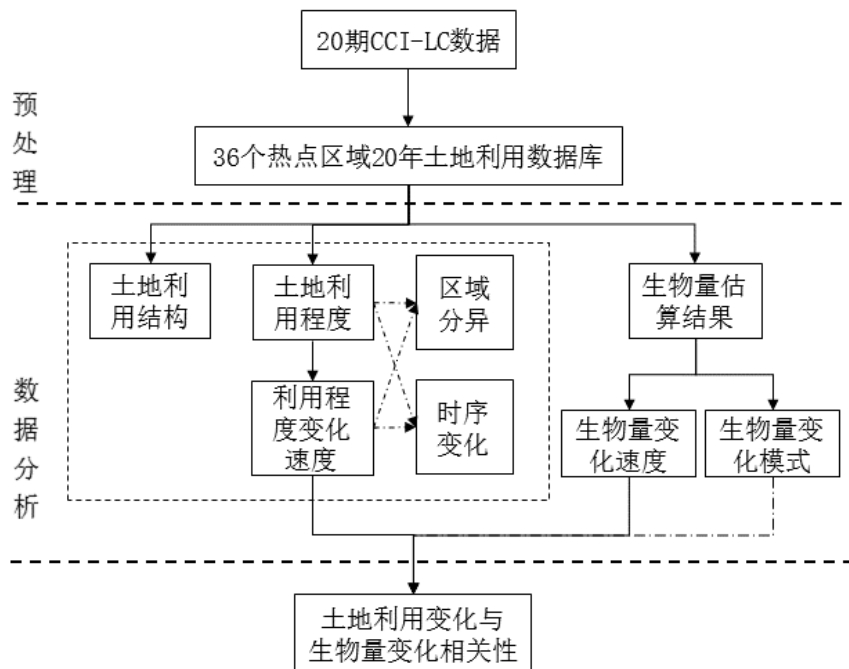


图 1.1 研究技术路线图

2 数据与方法

2.1 研究区概况

生物多样性热点区域的概念最早来源于 Myers 的“环保主义”和“热点：地球生物最富有和最濒危的陆地生态区”^[4]一书中，之后由 Mittermeier 等人组织的保护国际（Conservation International, CI）定期对全球热点区域做出评估，并更新划定生物多样性热点区域。截止 2016 年划定全球共 36 个生物多样性热点区域，包括由 Myers 等人 2000 年确定的 25 个热点区域，以及之后分批新增的 11 个热点区域。

文中选定的研究区域是由保护国际组织在 2016 年发布的 36 个全球生物多样性热点区域的陆地部分（图 2.1）。

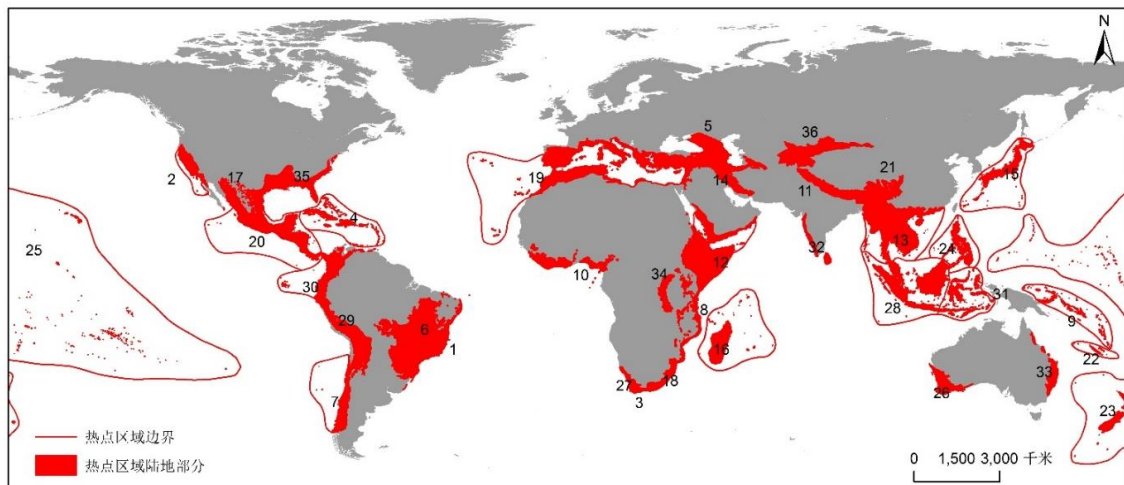


图 2.1 全球生物多样性热点区域分布图

图中编号及对应区域名称与缩写见表 2.1。

36 个生物多样性热点区域总面积接近地球表面积的 10%，其中陆地面积达到 2200 万平方公里，占地球陆地总面积的 14%。这些区域主要集中在南纬 45° 至北纬 45° 之间，包括北美洲、南美洲、欧洲、非洲、亚洲及澳洲在内几个主要大洲均有分布，其中近 80% 为热带雨林气候，为全世界近 60% 的植物、鸟类、哺乳动物、爬行动物和两栖类物种提供栖息地^[14]。

表 2.1 生物多样性热点区域名称

编号	全称	缩写	中文名
1	Atlantic Forest	Atlantic	大西洋森林
2	California Floristic Province	California	加利福尼亚植被区系
3	Cape Floristic Region	Cape	好望角
4	Caribbean Islands	Caribbean	加勒比群岛
5	Caucasus	Caucasus	高加索山脉
6	Cerrado	Cerrado	巴西高原植被带
7	Chilean Winter Rainfall and Valdivian Forests	Chilean	智利巴尔迪维亚冬雨林
8	Coastal Forests of Eastern Africa	East Africa	东非沿岸森林
9	East Melanesian Islands	Melanesian	美拉尼西亚
10	Guinean Forests of West Africa	West Africa	西非几内亚森林
11	Himalaya	Himalaya	喜马拉雅山地
12	Horn of Africa	Horn of Africa	非洲之角
13	Indo-Burma	Indo-Burma	印缅地区
14	Irano-Anatolian	Irano	伊朗-安纳托利亚地区
15	Japan	Japan	日本
16	Madagascar and the Indian Ocean Islands	Madagascar	马达加斯加和印度洋岛屿
17	Madrean Pine-Oak Woodlands	Madrean	马德雷
18	Maputaland-Pondoland-Albany	M.P.A	马普托兰-蓬多兰 奥尔巴尼地区
19	Mediterranean Basin	Mediterranean	地中海流域
20	Mesoamerica	Mesoamerica	中部美洲
21	Mountains of Southwest China	Southwest China	中国西南山地
22	New Caledonia	New Caledonia	新喀里多尼亚
23	New Zealand	New Zealand	新西兰
24	Philippines	Philippines	菲律宾群岛
25	Polynesia-Micronesia	Polynesia	波利尼西亚和 密克罗尼西亚
26	Southwest Australia	Southwest Australia	西南澳大利亚
27	Succulent Karoo	Succulent Karoo	肉质植物高原台地
28	Sundaland	Sundaland	巽他古陆
29	Tropical Andes	Tropical Andes	赤道安第斯山
30	Tumbes-Choco-Magdalena	T.C.M	通贝斯-乔科-马格达莱纳
31	Wallacea	Wallacea	华莱士地区
32	Western Ghats and Sri Lanka	Sri Lanka	西高止山脉和斯里兰卡
33	Forests of East Australia	East Australia	东澳大利亚森林
34	Eastern Afromontane	Eastern Afromontane	东部赤道非洲山地
35	North American Coastal Plain	North American	北美沿海平原
36	Mountains of Central Asia	Central Asia	中亚山脉

2.2 数据源选择

本文数据源为欧洲空间局（European Space Agency, ESA）发布的 CCI-LC（Climate Change Initiative-Land Cover）300m 分辨率土地利用数据集，

该数据集采用 ENVISAT MERIS 传感器及之后发射的 SPOT VGT（Vegetation）传感器获取的从 1992-2015 年遥感数据，参考联合国粮农组织定义的 Land Cover Classification System（LCCS）分类体系，将全球分为 22 个气候区，对每个区进行单独分类，先进行水体掩膜，然后用监督分类提取湿地和城镇，对剩余像元

进行多维聚类，得到分类结果。最终将分类结果镶嵌成一幅全球土地覆盖数据集。分类结果中包括 22 种一级土地覆盖利用类型，LCCS 分类体系见表 2.2。

根据杨永可等的研究成果^[15-18]，该数据及与同类数据集 IGBP DISCover、UMD、GlobalCover 等全球土地覆盖数据集相比，具有更高的总体精度（87%），并且数据空间分辨率高，数据时序长，具有很好的连续性，且对城市，水体等地类具有较高分类精度，但由于 1994 年传感器故障导致当年数据缺失。

本文选取了该数据集中 1995-2015 年 20 期、覆盖全球 36 个生物多样性热点区域陆地部分的多时相土地利用覆盖数据。

表 2.2 LCCS 分类体系

分类编码	类别	描述
10	旱田	
11	草本	
12	树或灌木	
20	水田	靠洪水淹没或者灌溉种植农作物耕地
30	农业 / 自然植被镶嵌体	耕地 (>50%) 草地 / 灌木 / 林地 (<50%)
40	自然植被 / 农业镶嵌体	草地 / 灌木 / 林地 (>50%) / 耕地 (<50%)
50	常绿阔叶林	
60	落叶阔叶林	
61	郁闭	树冠覆盖率>50%
62	稀疏	树冠覆盖率 50—50%
70	常绿针叶林	
80	落叶针叶林	
90	稀疏落叶 / 常绿针叶林	针叶阔叶混交林
100	林地灌木 / 草地镶嵌体	林地或灌木 (>50) 草地 (<50%) 镶嵌体
110	草地 / 林地灌木镶嵌体	草地 (>50) 林地灌木 (<50%) 镶嵌体
120	灌木林	草地 (>50%) 林地 / 灌木 (<50%) 镶嵌体
130	草地	灌木覆盖率>15%、阔叶或针叶、常绿或落叶
140	地衣苔藓	草本植被覆盖率>15%、草地或树林草原或苔藓地衣
150	稀疏植被	植被覆盖率<15%
160	淡水淹没林	林地覆盖率>15、阔叶、定期淹没、淡水
170	咸水淹没林	林地覆盖率>40%、阔叶林或灌木、咸水或微咸水
180	淡水 / 咸水淹没植被	草地或木本植被覆盖率>15%、淡水或海水定期淹没
190	城镇	人工表面或相关区域、人工表面覆盖率>50%
200	裸地	裸露的土壤、沙漠、巧石等，植被覆盖率常年<15%
210	水体	海洋、湖泊、水库、河流等，包括咸水和淡水
220	雪和冰	永久性积雪或冰

2.3 研究方法

2.3.1 变化过程测度方法

对于一个动态过程，对其变化的测度法有很多。地类变化、土地利用程度变化都可以看做一个动态过程，为了更全面的测度土地利用变化动态过程，本文采用了以幅度和速度为主的测度方法，分别对动态过程的绝对变化情况和相对变化情况进行描述。

(1) 变化幅度

变化幅度定义为一定时间段内测度对象的变化量。计算公式如下：

$$E(i, j) = Dj - Di \quad (2.1)$$

式子中， Di ， Dj 分别为第 i 年、第 j 年的测度对象的绝对量， $E(i, j)$ 表示第 i 年到第 j 年测度对象的变化幅度。

幅度能够很好地表征测度对象在一个时间段内的绝对变化情况。

(2) 变化速度

一段时间内地类变化速率计算方法一般有两种，一是将最后时间点地类面积减去开始时间点地类面积除以时间得到每单位时间地类变化速率，结果应称为变化速率的年平均，表示始末时间点地类变化率的年平均值。二是将末尾时间点地类面积除以开始时间点地类面积，按时间开平方得到每单位时间地类变化速率，计算原理如下：

$$A_n = A_1(1 + \delta)^{n-1} \quad (2.2)$$

$$\delta = \sqrt[n-1]{A_n/A_1} - 1 \quad (2.3)$$

式子中 A_n 表示第 n 年地类面积， A_1 表示第 1 年地类面积， n 表示年份， δ 表示年均变化速度。

本文中所指的变化速度均是指由第二种方法求算出来的年均变化速度。变化速度能很好地表征测度对象在一个时间段内相对变化情况。

2.3.2 土地利用程度模型

在西藏自治区土地利用调查中，刘纪远等人^[19]提出了土地利用程度指数模型，认为在不同土地利用类型所对应的生态系统中，土地利用程度不同。例如对沙地，戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土等自然未利用或无法利用的土地利用类型，人类对该生态系统的利用程度很低，而对以农田生态系统为代表的人为再生利用类型，和以聚落生态系统为代表的人为非再生利用类型的(城镇、居民点、工矿用地、

交通用地等) 利用程度则较高, 而林地、草地、水域等自然再生类型的生态系统的土地利用程度则介于人为非再生利用类型和自然未利用类型之间。

基于不同土地利用程度对各生态系统类型进行分级赋值, 得到 4 种土地利用程度的分级指数 (表 2.3)。

表 2.3 土地利用程度分级

	自然未利用	自然再生利用	人为再生利用	人为非再生利用
土地利用程度	1	2	3	4
土地利用类型	雪地、沙漠、裸地	林地、草地、水域	农田	城镇
地类编码	14/20/22	4/5/6/7/8/9/10/11/ 12/13/15/16/17/18/21	1/2/3	19

对于某一个区域而言, 一般由有多种土地利用程度指数的生态系统类型共同组成, 且各自占有不同的比例, 若能求出其面积比例并以此为权重, 进行加权求和, 就可以得到在 1-4 之间分布的热点区域综合土地利用程度指数, 其值的大小反映了某一个地区人类的土地利用强度。

计算方法如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^4 A_i \times S_i}{\sum_{i=1}^4 S_i} \quad (2.4)$$

式中, A_i 表示第 i 级土地利用程度指数, S_i 表示区域中第 i 级生态系统面积, K 表示区域综合土地利用程度指数, 范围为 1 至 4。综合土地利用程度指数越高, 表征土地利用程度越高, 当同一个地区的土地利用程度指数升高时, 则认为人类活动增强, 该区域对生物多样性的威胁程度增加。

2.3.3 生物量估测方法

本文中所称生物量是生态学术语, 是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质 (干重) (包括生物体内所存食物的重量) 总量, 通常用 kg/m^2 表示。

通过研究不同大小栖息地上物种量变化的情况, 生物量与栖息地面积之间的关系已经被验证。尽管物种量与面积的关系的确切形态还存在争议^[20], 但他们之间的关系近似幂函数是毋庸置疑的。因此:

$$S_0 = cA_0^z \quad (2.5)$$

$$S_n = cA_n^z \quad (2.6)$$

式中 S_0 表示初期生物量, S_n 表示末期生物量, c 为生物丰度常数, z 为模型参数, A_0 表示初期栖息地面积, A_n 表示末期栖息地面积, n 为年份。因此易得:

$$S_n/S_0 = (A_n/A_0)^z \quad (2.7)$$

同时由生物量变化与栖息地面积变化过程可知：

$$S_n = S_0(1 + \alpha)^n \quad (2.8)$$

$$A_n = A_0(1 + \theta)^n \quad (2.9)$$

式子中 α 表示生物量年均变化率， θ 表示栖息地年均变化率。

由式子（2.5）至（2.9）可以推导出：

$$\alpha = (1 + \theta)^z - 1 \quad (2.10)$$

即生物量年均变化率与栖息地年均变化率的关系。尽管 z 的值随生态系统和分类单元变化而变化，但在生物多样性热点区域，经验值接近 0.25^[21]。本文采用这个值。

栖息地指物理和生物等环境因素构成适宜于动物居住的某一特定场所。栖息地的划定方法尚存在许多争议，对于不同尺度、不同生态系统而言，其划定方法是存在差异性的。根据现有针对生物多样性热点区域的研究^[20]，自然可再生土地覆盖类型与栖息地面积是线性相关的。根据计算的每个多样性自然可再生用地年均变化率，得到各区域生物量年均变化率。

2.3.3 地理分区

本文讨论 36 个生物多样性热点区域的变化情况，为了便于对比各区域之间的生物量、栖息地及土地利用程度的差异性，综合考虑各区域地理位置，气候状况，经济发展状况，将全球划分为七个大区：欧洲及中亚区，东南亚区，北美区，南美区，澳大利亚区，非洲区。其中欧洲及中亚区包括地中海海域，伊朗高原，中亚高原，喜马拉雅山脉及中国西南山地；东南亚区包括印度缅甸地区，斯里兰卡地区，印度尼西亚地区，菲律宾地区及日本岛；澳大利亚区包括澳大利亚东部西部热点区域，新西兰地区与太平洋地区；非洲包括所有非洲大陆上的热点区域及马达加斯加与阿拉伯半岛地区；北美区包括所有北美洲大陆热点区域与加勒比群岛；南美区包括所有位于南美大陆的生物多样性热点区域。

2.3.5 相关系数与显著性检验

在统计关系中，因果性与相关性是二元数据之间的主要性质。其中相关性是涉及依赖性的一类广泛的统计关系，在通常的用法中，它指的是两个变量彼此之间具有线性关系的程度。

相关系数是某种类型的相关性的数值度量，是两个变量之间的统计关系。皮尔逊相关系数，也称为 Pearson's R，是两个变量之间的线性关系的强度和方向

的量度，定义为由它们的标准偏差的乘积除以变量的协方差。是已知的和最常用的相关系数类型。

相关性系数有自己的定义和自己的可用范围和特性。假设值在从 1 到-1 的范围内，其中，1 表示最强正相关性，而-1 表示最强的负相关性。作为分析工具，相关系数也存在一定的问题，包括导致某些类型被异常值扭曲的倾向，以及导致不正确地被用来推断变量之间的因果关系。

3 热点区域土地利用变化分析

3.1 土地利用结构及其变化

基于土地利用程度指数模型中不同的生态系统类型划分土地利用类型，将各生物多样性热点区域划分为自然未利用地、自然可再生用地、人为可再生用地、人为非可再生用地。计算各区域各地类占比的逐年变化过程，得到地类占比的时序变化过程，如图 3.1。可以看出从 1995-2014 年大部分区域自然未利用地占比并未发生明显改变，其均值一直极小，个别区域没有自然未利用地；自然可再生用地在这个过程中，均值变化不大，但是自然可再生用地的占比范围变大了，说明部分区域自然可再生用地增加的同时存在部分区域自然可再生用地减少，两者存在同步变化使得 36 个区域占比的均值不变；人为可再生用地总体变化不大，均值略微下降，说明人为可再生用地的占比轻微下降了；各区域人为非再生用地逐年明显增加；普遍来说，这 36 个区域中自然可再生用地占 70%，人为可再生用地占 30%，而自然未利用地和人为非再生用地的所占比例极小。

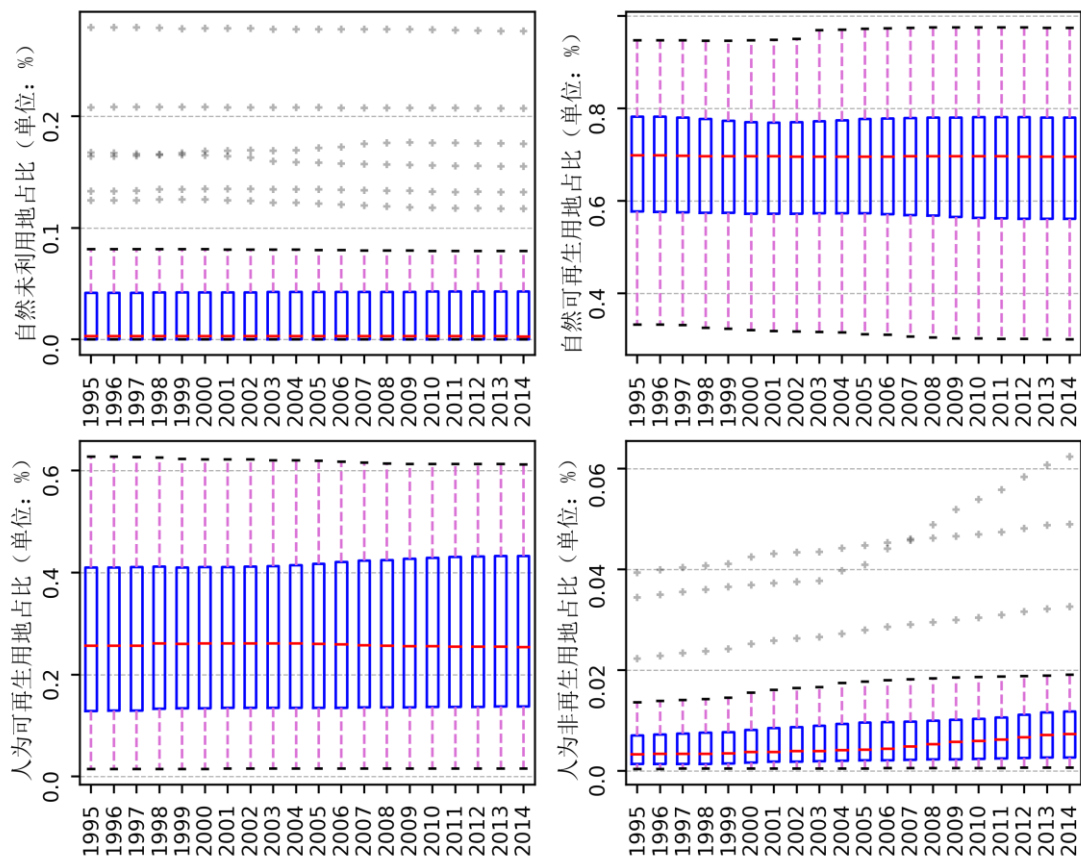


图 3.1 生物多样性热点区域地类时序变化情况

自然可再生用地在生物多样性热点区域中，占比最大（50%-90%），针对这种土地利用类别变化过程进行单独分析，能进一步了解生物多样性热点区域土地利用变化过程。对原始数据按照是否为栖息地进行重分类，计算得到每一年每一个生物多样性热点区域栖息地面积。

分析自然可再生用地在不同的地理分区上的差异性，为更清晰描述 1995 年至 2015 年各生物多样性热点区域自然可再生用地变化态势，采用自然可再生用地变化幅度和自然可再生用地变化速度两个指标进行测度。自然可再生用地变化幅度能很好地测度动态过程中变化绝对量的差异，自然可再生用地变化幅度大的区域，表示在 20 年土地利用变化过程中出现了较大面积的自然可再生用地丧失或增加。由于各个热点区域总面积存在较大差异，地类变化的绝对量存在对总面积的依赖性，因此引入自然可再生用地变化速度即自然可再生用地年均变化率为指标，测度动态过程中变化相对量的差异。自然可再生用地变化速度的大的区域，表示在 20 年土地利用变化过程中自然可再生用地出现了较大比例的丧失或增加。

计算结果表明，在 20 年生物多样性热点区域土地覆盖变化过程中，个别热点区域出现了自然可再生用地增加，生物多样性受威胁程度降低的情况。其中大西洋森林地区自然可再生用地增幅最大（1.16 万平方公里，编号 1），菲律宾群岛增速最快（0.18%/年，编号 24）。值得注意的是，同样位于东南亚地区环太平洋的两个相邻热点区域菲律宾群岛与巽他古陆，自然可再生用地变化的幅度和速度差异极大，前者出现了快速且幅度较大的增加，而后者出现了幅度大且速度较快的自然可再生用地丧失。

根据对生物多样性热点区域的地理分区，计算各分区内自然可再生用地变化幅度与自然可再生用地变化速度。计算结果见表 3.1。

表 3.1 各地理分区自然可再生用地变化态势

地理分区	热点区域总面积 (万平方公里)	自然可再生用地变化 幅度 (万平方公里)	自然可再生用地变化 速度 (%/年)
北美洲	303.7605	-1.24772	-0.02768
南美洲	470.7224	-1.66181	-0.02652
欧洲及中亚	547.9527	-4.26459	-0.08151
非洲	388.7389	-2.49833	-0.04942
东南亚	430.4399	-8.76271	-0.17838
澳洲	100.4164	-0.14275	-0.00925

从表中可以看出各地理分区生物多样性热点区域自然可再生用地都发生了不同程度的丧失，其中东南亚地区在与其他地理分区热点区域总面积差异不大的情

况下，热点区域自然可再生用地丧失幅度与自然可再生用地丧失速度接近其余各区域的总和。说明在过去的二十年中，东南亚地区是全球生物多样性热点区域自然可再生用地丧失幅度最大，丧失速度最快的区域，该地区的生物多样性受威胁程度严重。

3.2 土地利用程度的时序变化与区域分异

3.2.1 土地利用程度的时序变化

以 36 个生物多样性热点区域整体为对象，计算整体土地利用程度（如图 3.2）。近 20 年内，全球生物多样性热点区域土地利用程度整体呈上升态势，95-98 年期间上升速度大于 98-15 年，对变化曲线进行拟合，可以看出近 20 年内全球生物多样性热点区域土地利用程度平均以每年 0.0007 的速度增长，从 1995 年 2.2731 增长到 2014 年 2.2875，增幅为 0.63%。

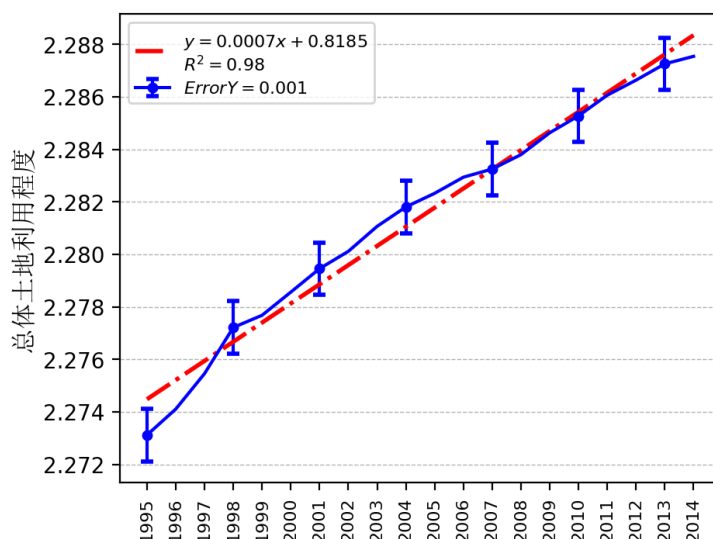


图 3.2 土地利用程度总体变化

通过对不同区域土地利用程度的时序变化分析表明，不同区域之间土地利用程度的变化过程存在类别上的差异，尽管以 36 个区域整体计算的土地利用程度呈现增加态势，但是存在个别区域土地利用程度在 1995-2015 年期间小幅下降。各区域土地利用程度的变化量与土地利用程度绝对量之间不存在相关性，即土地利用程度大的区域可能发生了较小速度的增长。

3.2.2 土地利用程度的区域分异

根据土地利用程度模型计算各生物多样性热点区域 1995 年、2015 年土地利用程度指数（图 3.3），由于土地利用程度的变化不明显，1995 年与 2015 年土地利用程度差异不大。可以看出，全球范围内土地利用程度最低的区域集中在东南

亚地区，其中土地利用程度最低的几个区域依次为新喀里多尼亚（1.2），华莱士地区（1.4），巽他古陆（1.5），菲律宾群岛（1.6），而全球范围内土地利用程度较高的区域依次为西非几内亚森林（2.6），高加索山脉（2.5），斯里兰卡（2.5），西南澳大利亚（2.4）。

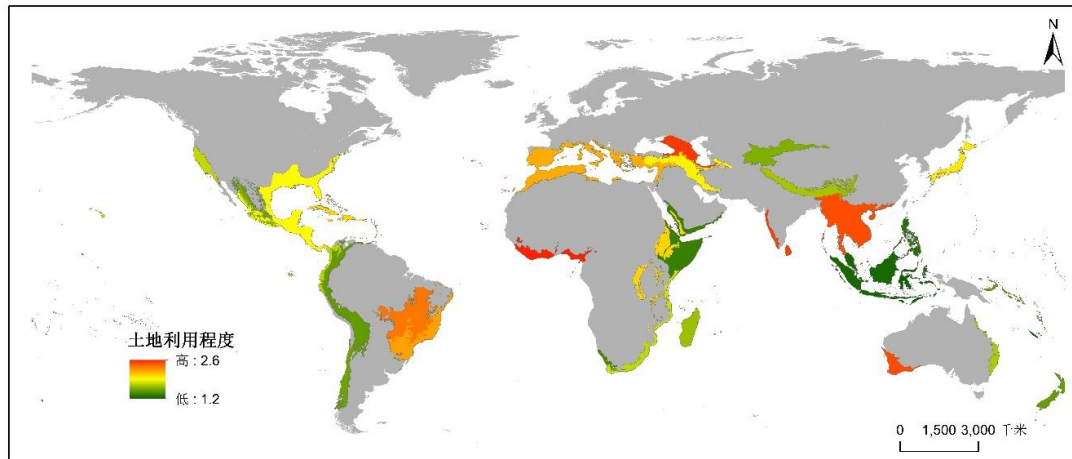


图 3.3 2015 年生物多样性热点区域土地利用程度区域分异

从地理分区角度来看，除东南亚区热点区域土地利用程度明显低于其他分区，各分区内热点区域土地利用程度大致相同。全球热点区域土地利用程度总体均值为 2.28。

3.3 土地利用程度动态过程的时序变化与区域分异

在土地利用程度的动态变化过程中，变化速度能够排除变化幅度对初值的依赖性，土地利用程度小的地区即使发生了程度较小的变化也有可能与土地利用程度大的区域得到相同的土地利用变化速度。

3.3.1 土地利用程度变化速度的时序变化

结合时间序列可以反映各区域土地利用程度各时段内的动态变化，计算各区域逐年的土地利用程度变化速度，如图 3.4。可以看出土地利用程度在前十年变化速度较快，且变化速度的分布范围较大，各区域之间差异较大；而后十年变化速度较慢，变化速度的分布范围较小，各区域之间差异较小。

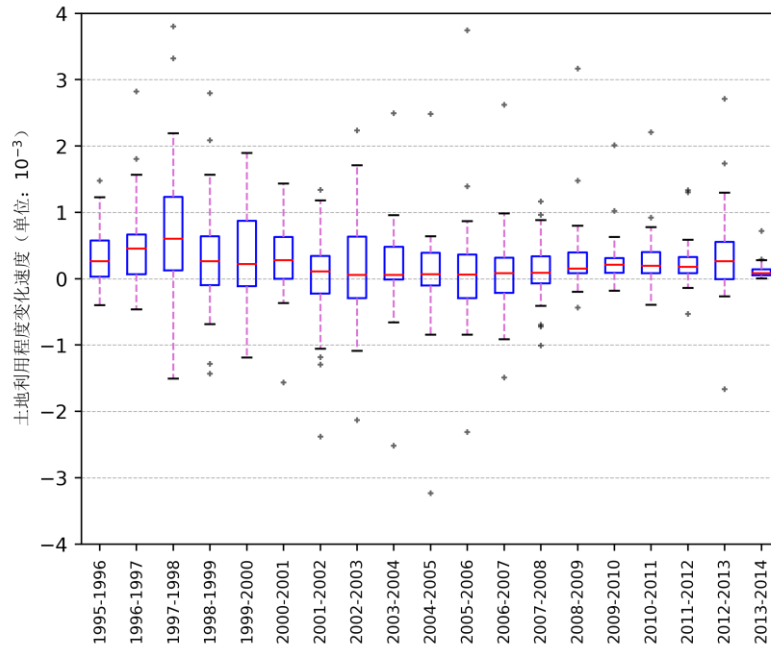


图 3.4 土地利用程度变化速度时序变化

3.3.2 土地利用程度变化速度的区域分异

为更清晰描述 1995 年至 2015 年各生物多样性热点区域土地利用程度区域分异情况，采用土地利用程度变化幅度与土地利用程度变化速度两个指标进行测度。土地利用程度变化幅度能很好地测度动态过程中变化的差异，土地利用程度增加幅度大的区域，表示在 20 年土地利用变化过程中出现了人类活动强度的增加，很有可能区域内发生了大幅度的土地利用活动，将自然未利用或自然可再生的土地转化为了人工可再生或不可再生的土地。

分别计算 1995 年和 2015 年各区域的土地利用程度，根据两者计算土地利用变化速度，结果见图 3.5。

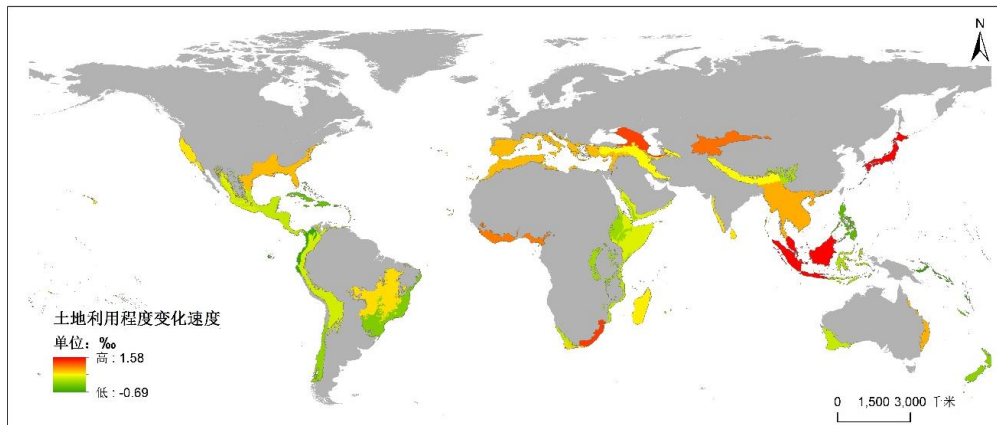


图 3.5 生物多样性热点区域土地利用程度变化速度区域分异

计算各热点区域从 1995 年至 2015 年土地利用程度变化幅度和土地利用程度变化速度，计算结果如图 3.6。从土地利用程度变化的角度来看，20 年间土地利

用程度增加幅度最大的区域依次是日本岛（0.0435，编号 15），东南亚的巽他古陆（0.043，编号 28）、高加索山脉（0.038，编号 5）、莫桑比克（0.034，编号 18），这四个热点区域土地利用程度增加幅度略高于第二梯度热点区域；20 年间土地利用程度增加速度最快的区域依次是东南亚的巽他古陆（1.5‰/年，编号 28）、日本岛（0.97‰/年，编号 15）、莫桑比克(0.8‰/年，编号 18)、高加索山脉（0.79‰/年，编号 5）。

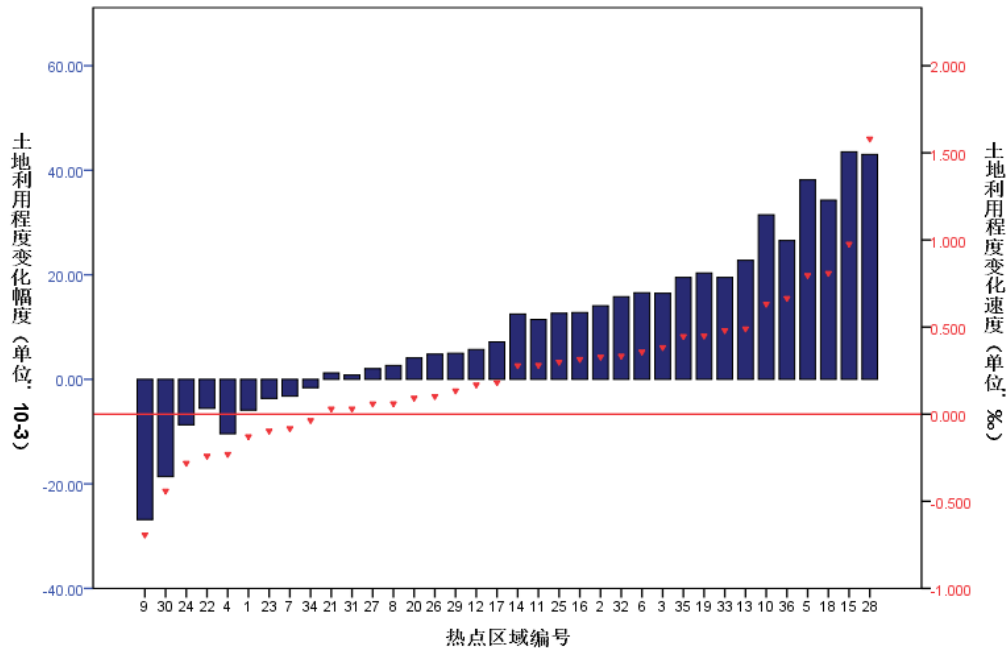


图 3.6 各热点区域土地利用程度变化幅度与变化速度

同时也应注意，在 20 年生物多样性热点区域土地覆盖变化过程中，个别热点区域出现了土地利用程度降低，区域内人类活动减弱的情况。其中美拉尼西亚地区栖息地增幅最大、增速最快（编号 9）。

综合土地利用程度与土地利用变化速度，计算土地利用程度与土地利用程度变化速度两者的相关性系数为-0.24，可以看出土地利用程度与土地利用程度变化速度相关性并不明显，无论土地利用程度高还是低的地区，其土地利用程度变化速度都有可能很快。对于位于东南亚的巽他古陆，其土地利用程度较低，但在过去的 20 年中，其土地利用变化速度很快，生物多样性受威胁形势严峻。而位于中东地区的伊朗高原，其土地利用程度处于较高的状态，且在过去 20 年中，土地利用程度变化速度也很快，说明该生物多样性热点区域整体处于较高的利用状态且在利用程度还在持续增加。

4 热点区域土地利用变化与生物量变化关联分析

4.1 生物量变化过程

本文中所称生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质干重总量（包括生物体内所存食物的重量），应当与广义生物量所指的个体数相区别。生物量能够直接反映生物多样性，生物量的减小即表示生物受威胁程度增加。

4.1.1 生物量变化过程模拟

对于小尺度范围的生物量估测常用抽样测定的方式，但对于大尺度区域测定其生物量是困难的，且没有必要的。就同一个地区而言，其生物丰度常数往往在较小范围内波动，因此，研究其栖息地绝对变化能够表征生物多样性的绝对变化程度。就不同区域而言，其生物丰度常数往往差异较大，研究生物量的变化速度能够表征生物多样性的相对变化过程。

生物量变化速度与栖息地变化速度之间存在着如式（4.1）的关系：

$$\alpha = (1 + \theta)^z - 1 \quad (4.1)$$

式子中 θ 表示栖息地变化速度， α 表示生物量变化速度， z 依生物多样性热点区域经验值定为 0.25。

栖息地指物理和生物等环境因素构成适宜于动物居住的某一特定场所。栖息地的划定方法尚存在许多争议，对于不同尺度、不同生态系统而言，其划定方法是存在差异性的，根据现有针对生物多样性热点区域的研究^[20]，自然可再生土地覆盖类型与栖息地面积是密切相关的。因此本文以自然可再生用地类型的变化速度作为栖息地的变化速度，求算栖息地的动态变化过程。值得一提的是，根据 Myers 等人总结 600 多篇论文资料得到的各热点区域面积与生物学家估算的生物量，各个热点区域之间生物量存在着 1-2 个数量级的差异。

根据 1995-2015 年 21 期土地覆盖数据集，可以求算出每个区域每两期之间栖息地变化速率，由栖息地变化速率得到生物量变化速率（公式 4.1）。由于各生物多样性热点区域生物量初值（1995 年热点区域生物量）没有准确数据，而生物量的变化速率不具有初值依赖性，因此对各生物多样性热点区域生物量初值做归一化处理，统一设置为 1。根据求算出的生物量变化速率，可以推算出下一年生物量，进而能够模拟从 1995-2015 年期间每一年各生物多样性热点区域的生物量变化过程。模拟结果如图 4.1。

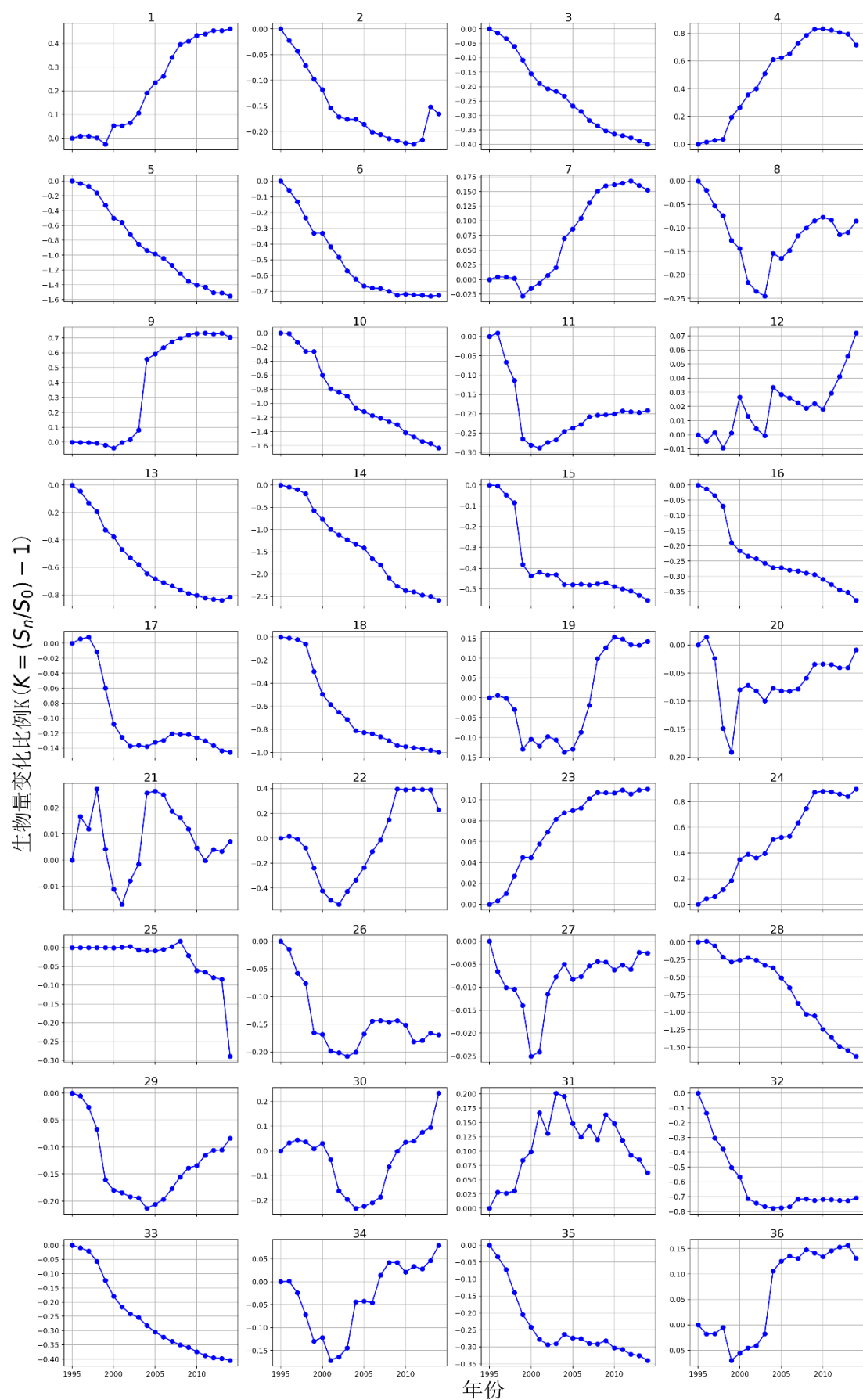


图 4.1 1995-2015 生物量变化模拟结果

4.1.2 生物量变化类别分析

根据生物量变化模拟的结果,对 36 个区域进行类别划分,以曲线的形态为主要划分依据。其中明显上升的包括编号为 1、4、7、9、12、23、24 号区域;明显下降的包括编号为 3、5、6、10、13、14、15、16、17、18、25、28、32、33、35 的区域;其余的基本上呈现先下降后上升的趋势,包括 2、8、11、19、20、21、22、26、27、29、30、34、36 号区域;31 号区域为华莱士地区,其变化模式作为特例处理,产生这种特例的原因可能是华莱士地区有面积积极小的海岛,降低了分类精度。

概括为生物量变化的有三种模式,第一模式为在 1995-2015 年期间生物量持续减少,按照这种模式变化的热点区域有 15 个,主要分布在非洲及东南亚地区,其中研究期间变化幅度最大的生物多样性热点区域为伊朗高原(编号 14),从 1995 年-2015 年生物量减少了 2.5%,这种剧烈的生物量变化可能与当地近 20 年来频繁战争相关。

第二种模式为在 1995-2015 年期间生物量持续增加,按照这种模式变化的热点区域有 7 个,其中研究期间生物量增加幅度最大的生物多样性热点区域为加勒比群岛(编号 4),从 1995-2015 年期间生物量增加了 0.8%,这种模式的变化可能与这些区域在过去二十年中采取了有效的生物保护措施相关。

第三种模式为在整个研究期间内,生物量变化出现先减少,后增加的形态。36 个热点区域内有 13 个区域在前 5-15 年生物量明显减少,但在后 5-15 年内出现了不同程度的生物量增加,其中最典型的如位于澳洲的新喀里多尼亚(编号 22),在 1995-2002 年期间生物量减少了 0.4%,但在 2002-2015 年期间生物量增加了 0.8%。

这三种模式的识别对判断热点区域保护措施是否有效,保护力度是否足够具有重要意义。对于在过去二十年以第一种模式变化的 15 个生物多样性热点区域,尽管该区域已经被划为热点,但并没有得到有效保护,存在保护措施不当,保护力度不够等诸多问题。而对于以第二种模式变化的 7 个热点区域,在过去的一段时间内发生了明显的生物量增加,应当考虑其继续作为生物多样性热点区域的必要性,适当的将有限的保护资源向其他地区倾斜。对于以第三种模式变化的 13 个热点区域,对比前一段生物量的减少,和后一段的生物量增加,可以看出在这些区域进行的生物多样性保护措施有良好的成效,这些区域的演变过程对生物多样性保护措施的制定可以起到很好地参考作用。

4.2 生物量动态过程的时序变化与区域分异

4.2.1 生物量动态过程的时序变化

结合时间序列可以反映各区域生物量各时段内的动态变化，计算各区域逐年的生物量变化速度，如图 4-2。可以看出生物量在前十年下降速度较快，且变化速度的分布范围较大，各区域之间差异较大；而后十年变化速度较慢，变化速度的分布范围较小，各区域之间差异较小。对比图 4.2 与图 3.4，土地利用程度的变化速度与生物量的变化速度可能存在相关性。

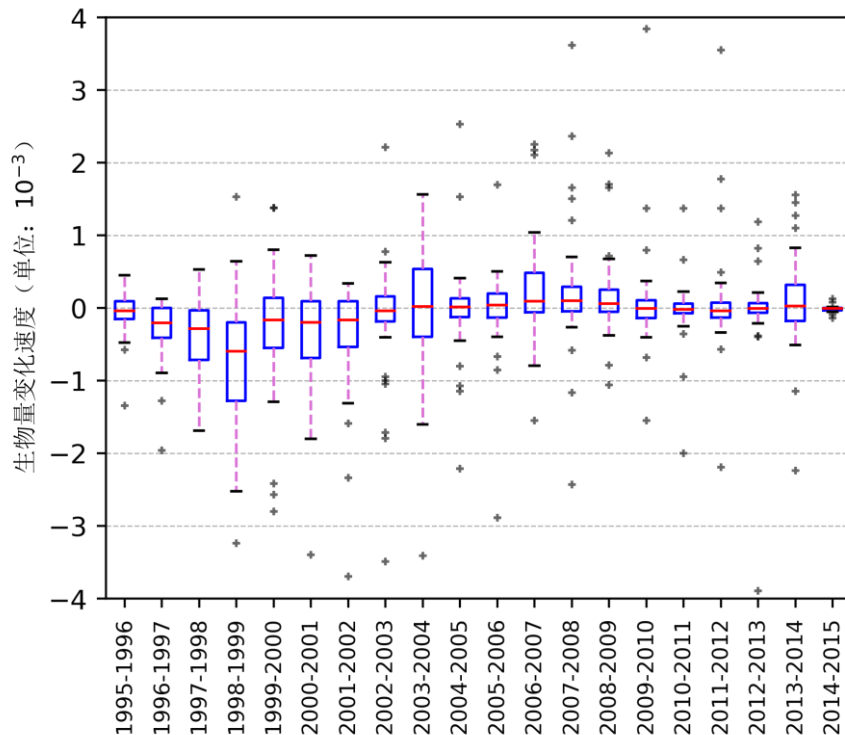


图 4.2 生物量变化速度时序变化

4.2.2 生物量动态过程的区域分异

根据生物量估算结果计算各区域 20 年生物量变化速度（年平均），得到生物量变化速度的区域分异情况，如图 4.3。

生物量减少速度较快的区域集中在东南亚与中东地区，而加勒比群岛，新西兰岛等地区生物量增长速度较快。各个区域之间生物量年均变化速度从 0.44%到-1.3%之间，发生生物量增长的区域的生物量增长速度要小于发生生物量减少的区域的生物量减少速度。但是这种计算生物量变化速度的方法假定生物量的变化是一个线性的过程，忽略了生物量变化动态过程中可能出现的先减后增等复杂多样的状况。

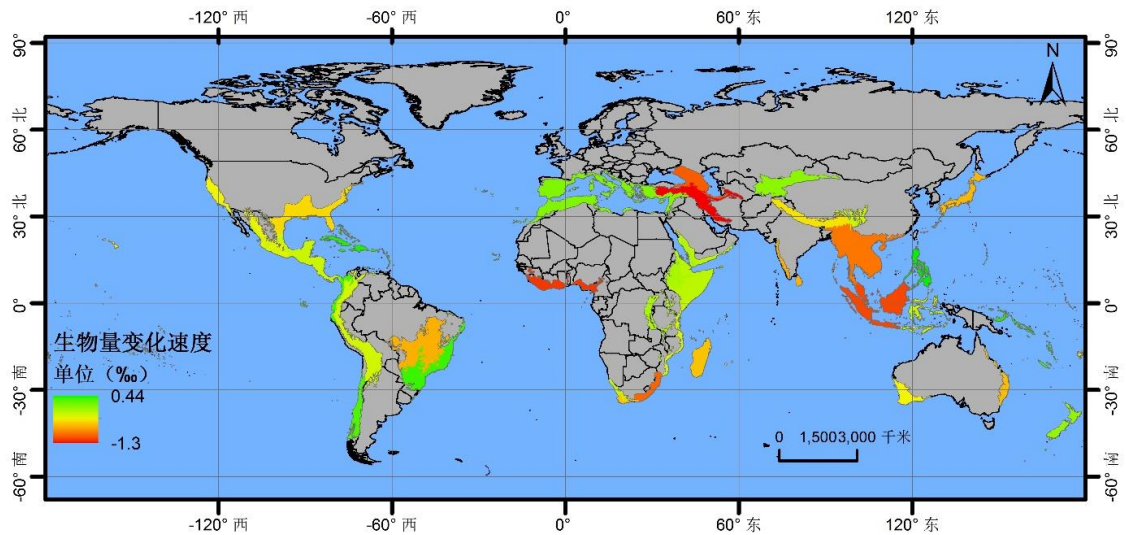


图 4.3 生物量变化速度区域分异

4.3 生物量变化与土地利用程度变化关联分析

对于大尺度范围内自然利用条件下的生态系统，土地利用程度不会发生明显变化，因此土地利用程度的变化可以客观的表征人类活动对土地利用的影响，即以开荒、耕地林地转化为建设用地为代表的人类活动会导致土地利用程度上升，而以退耕还林等措施为代表的人类活动会导致土地利用程度的下降。

生物量可以直接表征区域生物多样性，由于生物丰度常数在不同区域内差异较大，区域之间生物量绝对值与变化幅度的比较意义不大。

考虑土地利用程度变化与生物量变化的相关性，两者相关性越强，说明人类的土地利用活动对生物多样性的影响越强；如果两者相关性较弱，则说明人类的土地利用活动并不是生物量变化的主要影响因素。

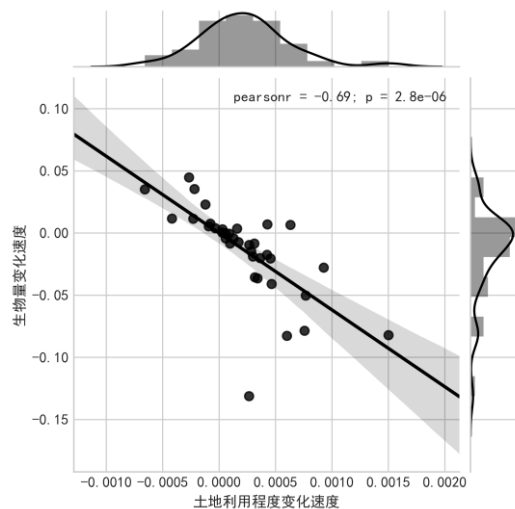


图 4.4 生物量变化与土地利用程度变化的相关性检验

计算 36 个区域 20 年间土地利用程度年均变化速度与生物量年均变化速度之间的相关性（如图 4.4）， p 值极小，相关性显著，皮尔逊相关性系数为-0.69，说明生物量变化速度与土地利用程度变化程度之间呈现强负相关，人类的土地利用活动是生物量变化的重要影响因素。

由于生物量变化存在不同的三种模式，对于持续增加和持续减少模式变化的生物多样性热点区域，分别计算这些区域生物量变化与土地利用程度变化之间的相关性，得到对于生物量以持续增加模式变化的生物多样性热点区域，相关性系数为-0.74（图 4.5 左），对于生物量以持续减少模式变化的生物多样性热点区域，相关性系数为-0.63（图 4.5 右）。在这里只讨论了相关性，对于两者变化的因果性需要进一步论证。

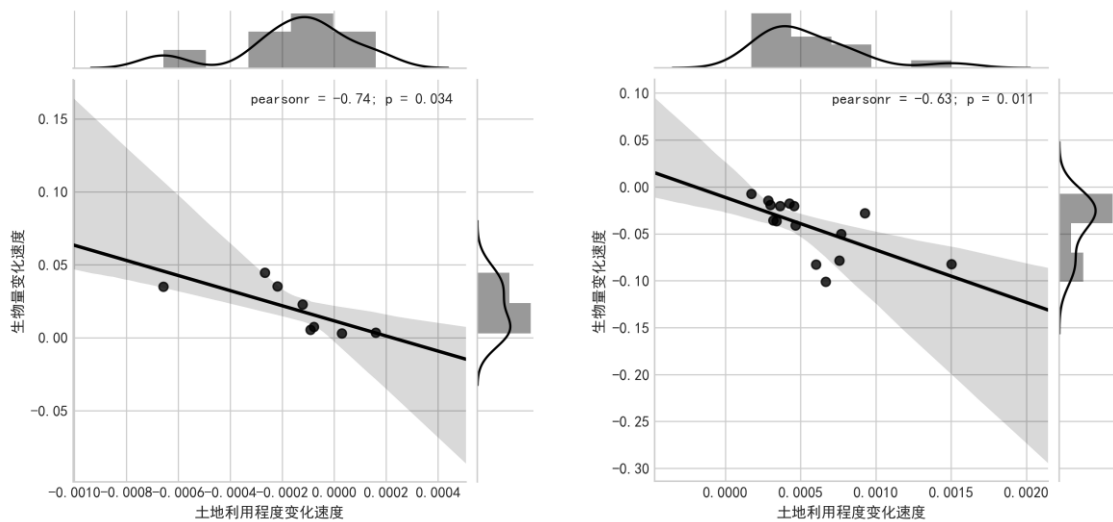


图 4.5 增加模式（左）与减少模式（右）生物量变化与土地利用程度相关性

借用经济学中的外部效应来描述土地利用程度变化对生物量变化的影响，如果用土地利用的正外部性表示土地利用程度降低导致的生物量增加，用土地利用的负外部性表示土地利用程度增加导致的生物量减少，可以看出土地利用的正外部性强于负外部性。

由此可见，人类的土地利用活动对生物量变化的外部效应明显，且土地利用对生物量影响的正外部性强于负外部性。一种可能的解释是人类的退耕还林，降低城市发展速度等土地利用活动是生物多样性增加速度变快主要影响因素；而人类增加林地开发速度，城市发展速度等土地利用活动与战争、外来物种、环境污染等因素相比对导致生物多样性较少速度变快的影响要弱。

5 结论与展望

5.1 结论

本文以全球生物多样性热点区域为研究区域，基于长时序土地利用分类数据，进行土地利用变化分析。通过构建土地利用程度指数，从状态和过程两个方面，揭示了过去 20 年土地利用程度的时序变化与区域分异特征；通过构建生物量估算模型，模拟了各区域生物量变化过程，归纳生物量变化的模式；采用相关性分析方法分析了生物量变化速度与土地利用程度变化的相关性。经过上述研究：本文获得以下主要结论：

（1）1995-2015 年期间生物多样性热点区域土地利用程度逐年增加，各热点地区土地利用程度指数差异明显，其中东南亚区自然可再生用地丧失的幅度和速度均远大于其他地理分区。从土地利用程度变化速度来看，二十年间土地利用程度增加速度最快的区域是位于东南亚的巽他古陆，整体而言，各区域 1995-2005 年土地利用程度增长速度快于 2005-2015 年。

（2）1995-2015 年期间各热点区域生物量变化的模式可以归纳为三类，主要包括连续增加，连续减少与其他类型。生物量增加最快的区域为加勒比群岛，生物量减少最快的区域集中在东南亚地区与中东地区。

（3）人类土地利用活动对生物量变化影响显著。生物量变化速度与土地利用程度指数变化速度具有显著的负相关关系，相关系数为-0.69。生物量以增加模式变化的生物多样性热点区域中土地利用变化与生物量变化的相关性强于生物量以减少模式变化的生物多样性热点区域，前者相关系数为-0.74，后者相关系数为-0.63。

5.2 研究展望

本文中所运用的土地利用程度指数模型中，不同土地覆盖类型的土地利用程度由人为指定，这种指数的确定方法存在缺陷。对生物量以先减后增模式变化的生物多样性热点区域，生物量变化与土地利用程度变化的相关性还需要进一步讨论。各区域生物多样性的影响因素的差异性的讨论还不够。讨论生物量与土地利用程度变化时，由相关性到因果性的过渡需要更充分的验证。

参考文献

- [1] 武建勇, 薛达元, 王爱华, 赵富伟. 生物多样性重要区域识别——国外案例、国内研究进展[J]. 生态学报, 2016,(10): 3108–3114.
- [2] Orme C D L, Davies R G, Burgess M, Eigenbrod F, Pickup N, Olson V A, Webster A J, Ding T-S, Rasmussen P C, Ridgely R S, Stattersfield A J, Bennett P M, Blackburn T M, Gaston K J, Owens I P F. Global hotspots of species richness are not congruent with endemism or threat[J]. Nature, 2005, 436(7053): 1016–1019.
- [3] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities[J]. Nature, 2000, 403(6772): 853–858.
- [4] Mittermeier R, Robles Gil P, Hoffmann M, Pilgrim J, Brooks T, Goettsch Mittermeier C, Lamoreux J, Fonseca G. Hotspots Revisited. Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions[M]. Conservation International, 2004:392.
- [5] Hanson T, Brooks T M, Fonseca G A. B D, Hoffmann M, Lamoreux J F, Machlis G, Mittermeier C G, Mittermeier R A, Pilgrim J D. Warfare in Biodiversity Hotspots[J]. Conservation Biology, 2009, 23(3): 578–587.
- [6] Cincotta R P, Wisniewski J. Human population in the biodiversity hotspots[J]. Nature, 2000, 404(6781): 990.
- [7] Seto K C, Güneralp B, Hutyrá L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(40): 16083–16088.
- [8] Kareiva P, Marvier M. Conserving biodiversity coldspots[J]. American Scientist; Research Triangle Park, 2003, 91(4): 344–351.
- [9] Daru B H, Bank M VAN DER, Davies T J. Spatial incongruence among hotspots and complementary areas of tree diversity in southern Africa[J]. Diversity and Distributions, 2015, 21(7): 769–780.
- [10] Falcucci A, Maiorano L, Boitani L. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation[J]. Landscape Ecology, 2007, 22(4): 617–631.
- [11] Basnou C, Álvarez E, Bagaria G, Guardiola M, Isern R, Vicente P, Pino J. Spatial Patterns of Land Use Changes Across a Mediterranean Metropolitan Landscape:

Implications for Biodiversity Management[J]. Environmental Management; New York, 2013, 52(4): 971–80.

[12] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997,(02): 10–16.

[13] Brooks T M, Mittermeier R A, Mittermeier C G, Fonseca G A B D, Rylands A B, Konstant W R, Flick P, Pilgrim J, Oldfield S, Magin G, Hilton-Taylor C. Habitat Loss and Extinction in the Hotspots of Biodiversity[J]. Conservation Biology, 2002, 16(4): 909–923.

[14] Biodiversity hotspot[EB/OL]. Wikipedia, 2018.

[15] Yang Y, Xiao P, Feng X, Li H. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 156–173.

[16] 杨永可. 大尺度土地覆盖数据集遥感评价研究[D].南京:南京大学, 2014.

[17] 杨永可, 肖鹏峰, 冯学智, 李海星, 常潇, 冯威丁. 大尺度土地覆盖数据集在中国及周边区域的精度评价[J]. 遥感学报, 2014,(02): 453–475.

[18] Tsendbazar N E, de Bruin S, Herold M. Assessing global land cover reference datasets for different user communities[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 103: 93–114.

[19] 刘纪远. 西藏自治区土地利用[M]. 北京科学出版社, 1992.

[20] Connor E F, McCoy E D. The Statistics and Biology of the Species-Area Relationship[J]. The American Naturalist, 1979, 113(6): 791–833.

[21] Lawton J. Species-Diversity in-Space and Time - Rosenzweig,ml[J]. Nature, 1995, 376(6541): 562–562.

致谢

时光荏苒，白驹过隙。在武汉大学本科四年学习生活即将画上句号，非常幸运能在这美丽的珞珈山水中度过这段充实多彩的青春岁月。首先，感谢我的指导老师焦利民教授。非常荣幸能向焦老师学习，老师治学严谨、为人谦和、对待科研认真执着。在毕业论文撰写过程中，从论文选题、方法、文章结构等方面给了我许多建议与指导。还要感谢唐旭老师、刘洋老师、孔雪松老师、胡石元老师等武汉大学国土资源系全体老师在我本科期间的淳淳教诲与指导。

感谢许刚师兄和董婷师姐，他们在学习生活和论文撰写过程中给了我许多意见和帮助，给了我很多指导和支持，引领我一点点接触科学研究；感谢我的同学、朋友，是你们朝夕相处的陪伴让我的大学生活更加丰富多彩；感谢求学之路上遇到的每个人，谢谢你们的支持和包容。

还有我的父母及家人，谢谢你们一直以来对我无微不至的关怀和疼爱，默默的为我付出，你们是我前进的动力。

如今，毕业在即，本科学习即将结束，这四年所经历的、收获的，我将永远铭记。最后，再次向所有关心帮助我的老师、同学、亲友表示由衷的感谢！我定当继续努力，不负众望。