



祁连山及山前绿洲荒漠区 生态水文研究

—— 牛 贇 主 编 ——



兰州大学出版社
LANZHOU UNIVERSITY PRESS



主编简介

牛贇，男，1974年生，博士（后），甘肃省通渭人。淮阴师范学院正高级工程师，研究生导师（兼）；张掖市管拔尖人才（第一层次），甘肃省领军后备人才。主持或参加项目（课题）30多项，主持国家自然科学基金1项，获科技成果奖11项，授权专利11项，发表论文90多篇（优秀论文奖19篇）。曾在甘肃张掖生态科学研究院、甘肃省祁连山水源涵养林研究院工作。

前 言

祁连山是甘肃、青海、内蒙古三省区经济社会发展和人民生产、生活的命脉，是我国西部重要的生态安全屏障，是黄河流域重要的水源产流地，也是我国生物多样性保护的优先区域。祁连山的生态保护和治理，直接关系到我国西部经济社会的可持续发展，对于促进西北地区民族团结、繁荣发展和边疆稳固尤为重要。祁连山冰川和生态环境保护与治理备受党中央国务院的高度重视。《全国生态功能区划》和《全国主体功能区规划》分别将祁连山地区作为50个国家重要生态功能区和25个重点生态功能区之一。祁连山水源涵养功能是我国干旱半干旱区的典型生态功能，祁连山是河西走廊三大内陆河的发源地，水源涵养功能的保护与发展是确保河西走廊可持续发展及其生态安全的重要保障。

甘肃省制定的《甘肃省“十三五”科技创新规划》明确提出“以开发水源涵养、湿地保护、荒漠化防治技术为重点，着力构建河西祁连山内陆河生态安全屏障”。按照山水林田湖是一个生命共同体的理念，祁连山是水源涵养区，而山前绿洲荒漠是耗水区，将祁连山水源林地与山前绿洲荒漠耗水区作为一个共同体来研究，探索生态与水文之间的内在联系，揭示流域河川径流与水源涵养功能的依存关系，深刻认识流域生态系统对于人类社会发展和维持生态安全的水文服务潜力，为发展和完善森林生态水文学提供研究成果和试验数据，为解决森林生态系统保护建设与开发利用水资源中潜在的林水矛盾提供参考和科学依据。

本书以甘肃张掖生态科学研究院承担完成的“甘肃省祁连山生态科技创新服务平台”项目为依托，利用国家林业局祁连山森林生态系统定位站、国家林业局黑河流域沙尘暴定位监测站多年监测数据资料，通过祁连山冻土区水文水资源、祁连山平原区沙尘暴预警、祁连山旅游区环境变化等监测，完成了祁连山青海云杉林群落结构特性及养分特征研究，祁连山西水林区青海云杉林、灌木林土壤和植物养分特征分析，祁连山三个典型青海云杉林区土壤特征比较，旅游对祁连山保护区土壤环境影响研究，祁连山大野口流域河川径流水文调节服务与水源涵养功能响应机理研究，黑河中游荒漠区典型植被变化与环境水分变化关系研究，祁连山及山前绿洲荒漠区生态水文监测系统构建，甘肃省祁连山区域生态环境遥感监测等专题。在这些专题实施过程中，获得省部级科技奖励2项、地厅级奖励4项，授权专利10项，发表论文41篇，培养博士后1名、硕博研究生3名。专题成果为祁连山及山前绿洲区生态水文研究资源整合及其技术组装提供载体，

为解决森林、灌丛、草地生态系统保护建设与开发利用中潜在的林水矛盾，促进和完善水源涵养林和荒漠化防治生态系统生态水文学理论，为在更高的层面上发展和完善森林和荒漠生态水文学科发展提供研究成果和试验数据支撑。

本书在淮阴师范学院、甘肃张掖生态科学研究院、甘肃省祁连山水源涵养林研究院等单位的共同资助和支持下，将过去的科研工作系统进行总结，期望能为从事生态水文研究和生态保护的工作者提供参考，能为生态学、水文学、自然地理学、环境科学等专业的学生的教学实践提供参考，为内陆河流域湿地保护和利用提供参考。

书中不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2018年3月于淮安

第一章 祁连山青海云杉林群落结构特性及养分特征研究	001
第一节 研究综述	003
1.1 森林动态观测大样地研究现状	003
1.2 林分结构研究现状	004
1.3 植被和土壤空间异质性研究现状	005
1.4 生态化学计量学研究现状	006
第二节 研究区域概况及研究方法	008
2.1 试验区概况	008
2.2 研究的目的和意义	010
2.3 研究内容	012
2.4 研究方法	013
第三节 祁连山青海云杉林林分结构	018
3.1 物种组成	018
3.2 径级结构	018
3.3 空间分布格局	019
3.4 讨论	020
3.5 小结	021
第四节 祁连山青海云杉林群落结构的空間異質性	021
4.1 群落结构属性的描述性统计分析	021
4.2 群落结构属性的空间自相关分析	022
4.3 群落结构属性的空间变异特征	023
4.4 群落结构属性的空间分布格局	025
4.5 讨论	026
4.6 小结	028
第五节 祁连山青海云杉林土壤养分的空间异质性	029
5.1 土壤pH和养分的描述性统计分析及正态分布检验	029
5.2 土壤pH和养分的空间异质性特征	030
5.3 土壤pH和养分的空间分布格局	032

5.4	讨论	033
5.5	小结	034
第六节	祁连山青海云杉林土壤有效微量元素含量特征	035
6.1	土壤有效微量元素含量	035
6.2	土壤微量元素有效性	036
6.3	土壤有机质和pH值及速效磷与有效微量元素的相关分析	036
6.4	讨论	037
6.5	小结	038
第七节	祁连山青海云杉林土壤有机碳与其他化学性质相互关系特征	039
7.1	土壤剖面有机碳含量变化	039
7.2	土壤剖面基本化学性质含量变化	040
7.3	土壤有机碳含量与基本化学性质的相互关系	041
7.4	讨论	042
7.5	小结	043
第八节	祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的 碳、氮、磷生态化学计量特征	043
8.1	叶片—枯落物—土壤的碳、氮、磷含量总体特征	043
8.2	叶片—枯落物—土壤的C:N、C:P和N:P生态化学计量比总体特征	045
8.3	叶片—枯落物—土壤的C:N、C:P和N:P的相关性	047
8.4	讨论	047
8.5	小结	050
第九节	结论与展望	051
9.1	主要研究结论	051
9.2	研究的创新性	053
9.3	研究工作的不足与展望	053
第二章	祁连山西水林区青海云杉林、灌木林土壤和植物养分特征分析	069
第一节	绪论	071
第二节	研究综述	072
2.1	国外研究发展概况	072
2.2	国内研究发展概况	073
2.3	祁连山研究发展概况	074
第三节	研究区概况	075
3.1	流域概况	075
3.2	样地概况	075
第四节	研究内容和方法	077
4.1	研究目标	077
4.2	研究内容	078

4.3	研究方法	079
4.4	研究技术路线	081
第五节	结果与分析	081
5.1	青海云杉林大样地土壤养分特征	081
5.2	青海云杉林林木器官养分特征分析	086
5.3	典型灌木林土壤养分	090
5.4	典型灌丛林木器官养分	093
5.5	青海云杉和典型灌木林生长与土壤养分的关系	097
第六节	结论与讨论	099
6.1	结论	099
6.2	讨论	100
第三章	祁连山三个典型青海云杉林区土壤特征比较	106
第一节	绪论	107
1.1	研究目的和意义	107
1.2	国外研究现状	108
1.3	国内研究现状	109
1.4	研究内容与方法	110
第二节	研究区概况	111
2.1	地理位置	111
2.2	气候特征	112
2.3	植被特征	113
2.4	土壤特征	113
2.5	水文特征	113
第三节	研究方法	114
3.1	样地布设	114
3.2	土样采集	116
3.3	指标测定与计算方法	117
3.4	技术处理	118
第四节	结果与分析	118
4.1	土壤剖面特征的描述性分析	118
4.2	土壤水分的空间变化	122
4.3	土壤容重的空间变化	125
4.4	土壤养分的空间变化	128
4.5	土壤有机质的空间变化	133
4.6	土壤pH的空间变化	134
第五节	结论与讨论	135

第四章 旅游对祁连山保护区土壤环境影响研究	141
第一节 绪论	142
1.1 研究意义	142
1.2 研究背景	142
第二节 研究区概况	144
第三节 研究内容与研究方案	145
3.1 研究目标	145
3.2 研究内容	146
3.3 研究方案	146
第四节 祁连山大野口森林公园游客行为特征研究	147
4.1 游客地域结构分析	147
4.2 游客结构	148
4.3 行为特征分析	150
4.4 游客感知评价	150
第五节 祁连山大野口森林公园旅游垃圾调查研究	151
5.1 垃圾来源分类	151
5.2 旅游垃圾的特征	152
5.3 旅游垃圾存在的问题	152
第六节 旅游干扰对祁连山风景区土壤性质的影响	152
6.1 试验设计	152
6.2 数据处理	153
6.3 旅游活动对土壤pH的影响	153
6.4 旅游活动对土壤容重的影响	154
6.5 旅游活动对土壤含水量的影响	155
6.6 旅游活动对土壤有机质的影响	155
6.7 旅游活动对土壤大量养分元素的影响	156
6.8 旅游活动对土壤微量元素的影响	157
第七节 结论与建议	158
7.1 结论	158
7.2 建议	159
7.3 研究的创新与特色	161
7.4 不足与展望	161
第五章 祁连山大野口流域河川径流水文调节服务与水源涵养功能 响应机理研究	166
第一节 绪论	169
1.1 研究意义	169

1.2	研究背景	170
1.3	水源涵养功能水文过程研究	173
1.4	存在的问题	178
第二节	研究区概况	178
2.1	地理位置	179
2.2	地质地貌	179
2.3	气候条件	180
2.4	河流水系	181
2.5	土壤特征	184
2.6	植被分布	186
2.7	试验流域	188
第三节	研究内容与研究方案	191
3.1	研究目标	191
3.2	研究内容	191
3.3	技术路线	193
3.4	研究方案	194
第四节	试验监测与研究方法	195
4.1	试验样地监测与计算方法	195
4.2	数据分析与处理	203
第五节	降水、土壤水与河川径流的关系分析	204
5.1	河川径流水位与流速的关系分析	204
5.2	降水、土壤水与河川径流的关系分析	207
5.3	气温、降水与河川径流的关系分析	212
第六节	土壤温度、冻土冻融与河川径流的关系分析	218
6.1	季节性冻土冻融过程对空间因子变化的响应关系	218
6.2	土壤温度、冻土冻融与河川径流的关系分析	224
6.3	气温、积雪消融与河川径流的关系分析	227
第七节	苔藓枯落物、土壤水热、土壤特性及土壤蒸发的关系分析	230
7.1	土壤水热垂直分层变化特征分析	230
7.2	土壤水热空间变化特征分析	233
7.3	苔藓枯落物与土壤水热特征的关系分析	239
7.4	土壤特性与土壤蒸发的关系分析	243
第八节	林分结构、林冠截留、土壤水热的关系分析	246
8.1	青海云杉林分结构分析	246
8.2	青海云杉林分结构与林冠截留的关系分析	250
8.3	青海云杉林分结构与土壤水热特征关系分析	252

第九节 结论与讨论	253
9.1 结论	253
9.2 讨论	260
9.3 研究创新与展望	262
第六章 黑河中游荒漠区典型植被变化与环境水分关系研究	271
第一节 研究综述	274
1.1 研究背景及意义	274
1.2 国内外研究现状与发展趋势	275
第二节 研究区概况	277
第三节 数据来源与分析方法	278
3.1 数据来源	278
3.2 分析方法	282
3.3 技术路线图	284
第四节 研究结果与分析	285
4.1 上游与中游降水、气温对比分析	285
4.2 中游降水、土壤水、地下水相关性分析	291
4.3 兔儿坝荒漠区植物生长与水分变化分析	296
4.4 龙首滩荒漠区植物生长与水分变化分析	302
4.5 西墩滩荒漠区植物生长与水分变化分析	306
4.6 高崖盐碱地植物生长与水分变化分析	310
4.7 中游荒漠区植物生长与水分变化关系分析	316
4.8 中游北部荒漠区生态环境评价	321
第五节 结论	323
5.1 流域上游与中游气候对比	323
5.2 流域中游水资源转化	324
5.3 兔儿坝荒漠区植物生长与水分变化关系	324
5.4 龙首滩荒漠区植物生长与水分变化关系	325
5.5 西墩滩荒漠区植物生长与水分变化关系	325
5.6 盐碱地荒漠区植物生长与水分变化关系	326
5.7 中游荒漠区植物生长与水分变化关系分析	326
第七章 祁连山及山前绿洲荒漠区生态水文监测系统建设	330
第一节 项目研究内容	331
1.1 总体技术方案	331
1.2 主要工作	331
第二节 主要阶段性成果	339

第八章 甘肃省祁连山区域生态环境遥感监测	340
第一节 甘肃祁连山概况	341
1.1 祁连山区域概况	341
1.2 区域自然地理特征	341
第二节 区域植被覆盖变化监测	342
2.1 大野口流域概况	342
2.2 技术方案	342
2.3 结果统计与分析	342
第三节 区域植被覆盖度和NPP变化监测	349
3.1 基于NDVI数据计算植被生长季	349
3.2 基于遥感数据的区域植被覆盖度计算	349
3.3 基于C-FIX模型的区域植被净初级生产力遥感估算	352
第四节 结论	352
附表1 2600~2800 m地类分布统计表	354
附表2 2800~3000 m地类分布统计表	355
附表3 3000~3200 m地类分布统计表	356
附表4 3200~3400 m地类分布统计表	357
附表5 3400~3600 m地类分布统计表	358
附表6 3600~3800 m地类分布统计表	359
附表7 3800~4000 m地类分布统计表	360
附表8 4000~4200 m地类分布统计表	361
附表9 4200~4400 m地类分布统计表	362
附表10 4400~4600 m地类分布统计表	363
附表11 各县不同年份植被覆盖度最小值、最大值和平均值统计表(%)	364
附表12 各县不同年份NPP最小值、最大值和平均值统计表[g/(mg·月)]	366
附录 甘肃张掖生态科学研究院	368

第一章 祁连山青海云杉林群落结构特性及养分特征研究

森林群落是以乔木林为主体,与周围生长环境包括植物、动物、微生物以及生长所需的水、土、气等相互共存而形成的综合生态系统,在这个生态系统中,森林群落与环境协同进化,形成了具有区域特色的植被类型及其组成成分的生态学特性,这就是群落植被与环境综合关系的反应。森林群落植被是一个具有镶嵌性质的异质体^[1],群落通过与环境因素相互作用,导致群落结构分布的空间异质性,特别是在特殊的环境条件下,群落内的关键种或优势种的空间分布反映了群落为维持自我稳定而做出对环境干扰的生态格局和过程,对维持群落稳定起着关键作用^[2]。与森林植被生长密切相关的养分循环,其与森林内部变化是不可分离的,森林林木在生长过程中,通过新陈代谢将有机养分以凋落物的形式归还到生态系统中用于植物生长需要,是影响森林林木个体生长、种群数量、群落动态、物种共存,乃至生态系统结构和功能的重要因素^[3-4]。认识植物物质生产过程中不同养分元素的相互关系,对生态系统生源要素耦合循环过程的理解显得尤为重要。

分布大面积水源涵养林的祁连山,位于中国青海省东北部与甘肃省西部边境,是中国境内主要山脉之一。被誉为河西走廊的生命之源和我国西北地区的生态屏障——祁连山水源涵养林,为当地经济发展和社会稳定提供了丰富的水资源,是一座巨大的天然固体水库。经统计,2013年祁连山北坡有林地面积达到 $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[5],庞大的森林面积在维系祁连山重要生态功能中发挥着独特作用,是保证生态系统稳定和多种服务功能发挥的关键。因祁连山森林生态地位的重要性,历来受到国家高层决策部门和领导以及专家和学者的广泛关注。政策导向的正确使得祁连山森林面积近些年来不断增加,但是保护与利用的矛盾仍然突出^[5]。2015年,环境保护部卫星环境应用中心和西北环境保护督查中心分别对甘肃祁连山国家级自然保护区进行遥感监测与实地核查,结果发现,该保护区内矿产资源开发和水电设施建设活动明显,旅游设施未批先建,生态环境局部有所恶化。祁连山的生态环境问题从根源上说就是整个生态系统的问题,在这个系统中气候、森林、土壤、灌草、人类等如何相互影响的,

在森林结构特性和养分特征方面有待深入研究。

地处干旱半干旱地区的祁连山是青藏高原、内蒙古高原和黄土高原的过渡区^[6],高海拔、低气温气候特征使得祁连山北坡分布的干草原、青海云杉林和高寒草甸植被及土壤对气候变化极为敏感,为研究该区不同生态系统的结构特性和养分特征提供了非常理想的研究场所,已成为地学、生态学研究关注的热点地区^[7]。分布在其阴坡、半阴坡的关键种或优势种青海云杉林生长受山地气候、地形、土壤、干扰和生物学特性的综合影响,森林生态系统环境较为脆弱,生态系统的稳定性和抗干扰性差^[8-9]。由于人类活动的长期干扰,该区生态系统退化严重,服务功能降低,逆向演化显著,进程加快^[10],给区域生态环境建设和经济发展带来了负面影响。通过详细的森林观测研究,可以证明和理解这些变化背后的生理和生态机制,从而可以估测森林群落的更长期和更大规模的变化。如何有效阐述森林群落结构和养分在空间上的分布、变异和相关特征,将生态过程和空间格局结合起来,传统的取样面积和调查方法不能满足监测种群生长、出生和死亡动态过程的这个要求。在大面积固定样地上开展动态观测研究和不同样地生态学过程实证观测与分析,也是我国森林生态系统监测3条样带(东北阔叶红松林样带、中部油松林样带和西部云冷杉林样带)中西部云冷杉林样带的重要组成部分,与国家“生态安全战略格局”和“两屏三带”生态安全战略格局紧密相关。特别是填补了我国大型森林群落动态网络中中纬度北温带山地寒温性针叶林生态系统类型的不足。因此,通过森林动态观测大样地结合长期固定观测小样地研究祁连山青海云杉林群落结构和养分的空间格局对生态功能和过程的响应,这对青海云杉林的恢复与重建及土壤资源的可持续利用具有重要的意义。

本研究基于这样一个背景下,选择分布在祁连山中段西水林区大野口流域青海云杉林为研究对象,应用国内外成熟的森林生态学、土壤学、化学计量学、地统计学等理论和方法,以祁连山国家级森林生态站在青海云杉林群落内建立的10.2 hm²动态观测大样地和建立在不同海拔梯度上的长期固定监测样地(20 m×20 m)为试验样地,通过对试验样地青海云杉林群落结构和养分的定位观测与分析,研究青海云杉林林分结构和群落结构的结构特性,土壤养分空间异质性、有效微量元素含量的可获得性、土壤养分与有机碳的相互关系等养分变化特征以及养分在青海云杉林植被和土壤间的运移特征,探讨自然状态下的青海云杉林结构特性和养分特征,为合理保护、恢复与重建生长在严酷脆弱生态环境的青海云杉林生态系统可持续利用提供理论依据和数据支持,也为我国亚高寒山地地区的结构特性与养分特征的研究提供基础的理论依据。

第一节 研究综述

1.1 森林动态观测大样地研究现状

随着人类数量的增加,由此带来的农业、工业、城市化等经济的快速发展,人类对自然资源的索取变本加厉,使得地球不堪重负,特别是作为陆地上最大的生态系统——森林生态系统,面临着系统内物种的消失、生态服务功能的降低、环境污染、森林被砍伐、全球气候变化等一系列不良影响,森林面临越来越严重的破坏,生态功能退化或丧失。森林生态系统的变化引起了全球生态学家们和科研机构的极大关注,对这个问题的解决,需要大量的科学数据进行生态过程和机理的研究,以大型固定样地(动态观测大样地)进行森林生态监测受到了越来越多的关注,为监测森林的变化过程、变化的影响以及可能采取的应对措施提供了数据支撑。

在国外,利用动态观测大样地开展科研工作较早,1975年,在哥斯达黎加的干旱森林生态系统建立了13 hm²的大样地^[11]。1980年,美国Smithsonian研究院热带森林研究所(Smithsonian Tropical Researcher Institute)热带森林科学研究中心(the Center for Tropical Forest Science, CTFS)巴洛科罗拉多岛(Barro Colorado Island)建立了50 hm²大样地,并建立了森林监测网络,标志着国外森林动态监测工作的开始。自此开始,截至2014年,在全球的6大洲24个国家,建立了63个动态观测大样地,涉及10000个种,600万棵树,发表相关论文500多篇,包括在《Ecology Letter》《Ecology》《Ecography》《American Naturalist》《Journal of Ecology》等主流期刊上发表论文多篇,出版专著20多本,如《FOREST ECONOMICS》《PASOH 50-HA PLOT DATA BOOK》《LAMBIR 52-HA PLOT DATA BOOK》等^[12],在生态学领域起到了很大的影响。研究成果主要集中在以下几个方面:亚洲季节性干旱森林生态和保护^[13];森林种群生态学和空间分布格局研究^[14];物种多样性维持机制,诸如“中度干扰假说”^[15]、“生态位分化理论”^[16]、“Janzen和Cinnell假说”^[17]、“幼苗补充限制假说”^[18]等假说的论证和质疑;气候变化对森林的响应^[19];采伐与生境片段化的效应^[20]等,对传统生态学一些理论提出了质疑和创新。这些研究成果为世界各国森林动态观测大样地建设制定了统一标准,为国际交流和合作建立了良好的平台,也为其他国家和地区的动态观测大样地提供了理论支撑。

森林动态观测大样地是指在典型森林地段建立的面积为6 hm²以上,用于观测森林生态系统物种组成、空间分布格局及其对生境的响应、森林种子雨散布、幼苗更新动态变化过程等所设置的永久性固定样地^[21]。2004年,中国云南西双版纳首次建立了森林动态观测大样地,截至2014年底,已在中国的温带、热带和亚热带共建立了13个大型固定样地^[22],而且主样地旁边建有若干个辅助样地,涉及1357个种,117万棵树,涵盖了不同纬度带的森林植被类型,包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、针阔混交林以及热带雨林。发表相关论文200多篇,其中SCI论文100多篇,包括一些知名期刊,如《Ecology Letters》《Ecology》等。森林动态观测大样地已成为我国生

态学发展的重要平台，同时也带动了国家林业局、教育部和环保部门的大样地建设^[23]，以公顷样地为主的森林生物多样性监测受到越来越多人的关注，为人们了解生物多样性的变化及其影响，理解物种共存机制等提供了翔实的数据，是对CFTS监测网络的有机补充。

经过10年的发展，通过建立的森林动态观测大样地为研究试验地，出现了富有新发现的研究成果：裴男才等^[24]采用国际通用的叶绿体基因条形码片段（*rbcL*、*matK*、*trnH-psbA*），发现基于全球13个森林大样地1270多种木本植物的物种辨别成功率在84%以上，进而提出植物物种辨别效果与近缘类群有显著关联。陈云等^[25]对宝天曼自然保护区不同生活型物种与土壤相关性分析发现，土壤理化性质对物种分布有重要影响，支持物种共存机制中的生态位理论。刘妍妍等^[26]对凉水国家级自然保护区阔叶红松林林隙对幼苗建立的影响研究发现，林隙对幼苗的建立具有显著的促进作用。房帅等^[27]对长白山阔叶红松林不同空间尺度的功能性状与系统发育结构的研究表明，非中性过程在对阔叶红松林的生物多样性维持中具有重要作用。张娜等^[28]对浙江天童常绿阔叶林土壤pH值、养分及其与地形的关系研究表明，地形因子可在一定程度上解释土壤性质的空间变异。闫慧等^[29]采用探地雷达技术对浙江古田山24 hm²样地粗根（直径>1.5 cm）分布和生物量进行了测定。尽管研究内容相对分散，包括跨区域尺度或全球尺度上的研究，森林生态机理方面的研究以及生态研究技术和方法创新研究，但森林动态监测大样地作为一种生态监测手段逐渐成为重要的生态学研究平台。

1.2 林分结构研究现状

林分结构是指一个林分的树种组成、树高分布、年龄分布、直径分布和林分空间配置等指标的描述^[30]，这些指标参数与林分的结构和功能有着密切的关系，从数量和群体结构上表征了林分的重要特征等信息，也是传统森林资源调查的主要内容，对森林经营管理和优化决策具有重要的意义，在国内外森林经营管理中已取得了共识。林分树种组成反应了森林生态系统的稳定性和潜在物种多样性的高低。王震洪等^[31]对常绿阔叶次生林植物多样性和群落结构研究表明，植物多样性与群落个体密度间呈正相关，与植物个体平均高呈负相关；同时研究还表明，为了提高种间竞争能力，植物通过自我数量增加来改变群落结构。Sari Pitkänen^[32]用不同分类方法（DCA，GNMDS，LNMDS和HMDS）结合TWINSpan分类法对芬兰林分结构和地被物生物多样性之间的关系进行了研究，结果表明林龄小且土壤肥沃的林分物种多样性最高，树高分布状态决定着林下植被、出材量等因子的变化。王军等^[33]用Weibull分布密度函数对冀北山区典型森林树木树高分布规律进行了研究，Weibull分布密度函数在一定程度上反映了林分的树高分布规律。林分年龄可以用来描述森林的演替阶段、判断立地质量和确定经营措施的有效生态参数。对美国北迈阿密原始阔叶混交林结构研究表明，大多数树种年龄分布呈倒“J”型分布。因树高和年龄实测困难，而直径测定相对便利，直径分布对森林经营方案和模拟未来林分的收获预测具有重要的理论和实际操作意义而被广泛关注。如斯瓦洛夫^[34]对苏联远东地区松树、落叶松和云杉林分的直径结构研究发现，直径结构呈不

规则的山状曲线,表明该林分是异龄林。近年来 Weibull 直径分布模型被广泛应用, Sarkkola 等^[35]应用该模型对欧洲赤松的林分结构变化进行了研究,表明其具有很好的实用性。

树种组成、树高分布、年龄分布等指标参数的调查不受林分位置的限制,被称为非空间结构,把林木位置考虑进去的混交、竞争和林木分布格局三个方面的结构参数被称为空间结构^[36]。Gadow 等^[37]对森林混交的量化提出了混交度的概念,即任意一个树的最近相邻木为非同种的概率。惠刚盈^[38]是国内最早介绍混交度的国内学者,他提出了用“结构四组法”对林分空间结构进行分析。物种生长过程中涉及的竞争活动关乎生态系统的稳定性、生产力的形成、物种多样性等生态结构和过程^[39]。国内对林木竞争能力的量化也是惠刚盈等提出的大小比数,该结构参数量化了参照树与其相邻木的关系,是对相邻木关系大小分化度的完善和补充^[40]。林分空间分布格局是树种生长受到光照、干扰、微生境、地形、竞争、单株林木生长特征等综合作用的结果^[39],其在植物生态学领域备受重视。目前国际上研究林木空间分布格局主要采用双相关函数,基于 Ripley's $K(d)$ ^[41], Yasuhiro 等^[42]对日本针阔混交林林木空间结构研究分析表明,大多数树种呈聚集分布格局。惠刚盈^[43]和郝云庆等^[44]综合利用混交度、大小比数、角尺度对柳杉间伐前后空间结构变化进行了预测分析,为柳杉林分空间结构优化提供了科学依据。

1.3 植被和土壤空间异质性研究现状

植被空间异质性与土壤空间异质性的关系一直是生态学研究的重点问题^[45-46]。空间异质性是指生态学过程和格局在空间分布上的复杂性和变异性^[47],复杂性是对生态学过程和格局的定性描述,而变异性是对生态学过程和格局的定量描述。森林植被在生长过程中,受气候、土壤、地形、干扰等因素的影响,植物个体之间通过长时间对这些因子的响应和反馈,形成了具有不同层次、不同尺度上的空间分布与配置,其分布是典型的分形维数体^[48],不管是森林群落还是森林景观均具有较高的空间异质性。森林植被不同层次通过利用不同尺度上的环境资源,不同尺度上的森林结构具有不同的秩序特点。尺度是研究某一物体或过程所采用的时间单位和空间单位,同时又可指某一物体或过程在空间和时间上所涉及的规模和幅度^[49]。然而空间异质性发生在多个尺度上,不同的尺度上会得出不同的研究结论,森林生态系统是一个多变量或矢量域,一些变量可以在连续尺度上测定,而另一些变量则可能是离散的。尺度过小,环境中空间分布格局在大尺度上不一定存在;尺度过大,小尺度上环境的空间分布格局在大尺度上不一定占主导地位。如何在合理的尺度上研究森林植被和土壤空间异质性,有助于深刻认识控制该尺度上的森林生态学过程和功能。目前对涉及尺度上的森林生态学格局和过程研究在研究方法上得到了不断的完善,尺度概念体系和尺度转换也得到了发展,诸如控制尺度的面积或时间间隔,以及在这个时空尺度上进一步划分为最小面积或最短时间。

森林群落是一个具有镶嵌性质的异质体^[50],群落通过与环境因素相互作用,导致群落结构分布的空间异质性,特别是在特殊的环境条件下,群落内的关键种或优势种的

空间分布反映了群落为维持自我稳定而做出对环境干扰的生态格局和过程,对维持群落稳定起着关键作用^[51]。然而,群落结构的分布格局对尺度依赖性使得其在空间上出现新的变化和特点^[52],如何将所有尺度上的群落结构和其可能发生的生态学特征联系起来,对其结构及维持机制有更加深入和完整的认识,分形几何学和地统计学为解决这一问题提供了切实可行的工具,因为它注重变量因子的空间过程,考虑其空间分布特征和空间自相关^[53],在国内外林业科学研究领域得到了广泛应用。例如,Hernandez等^[54]对阿塔卡马沙漠植物园病虫害进行研究,提出了利用地统计学方法优化森林调查的抽样设计;Akhavan等^[55]对伊朗里海地区的人工林树木属性应用地统计学进行了空间变异和估计分析;Sales等^[56]将海拔、植被类型和土壤质地作为预测变量,然后利用漂移克里格法对巴西Rondonia地区生物量进行了估计;彭晚霞等^[57]对喀斯特常绿落叶阔叶混交林植被的空间异质性研究,得出适宜的采样间隔为10 m左右,采样范围大于10 hm²,对于该区域森林长期动态观测大样地的建立具有指导意义。贺鹏等^[58]利用地统计学的普通克里格法和协同克里格法对吉林省金苍林场地上生物量进行了估计;常新华等^[59]利用Moran's I指数和双相关函数 $g(r)$ 分析了7个主要树种的空间分布格局及其与环境因子之间的关系。

土壤空间异质性是土壤重要的属性之一^[60],土壤理化性质是影响植物个体和种群繁衍、群落动态与物种共存乃至生态系统结构和功能的关键因素^[61-62]。因此,研究土壤理化性质空间异质性一直是生态学研究热点问题,地统计学理论为定量研究土壤养分空间异质性提供了一个有力的工具^[63]。国内外研究者对森林土壤养分空间异质性进行了大量研究,在一定程度上扩展了土壤空间异质性研究的应用地域和内容,如森林采伐对土壤水分、温度和养分在小尺度上的空间异质性具有显著影响^[64];Finzi等^[65]对处于演替后期的阔叶林研究指出,树冠与土壤全氮、全碳、pH和阳离子交换量之间有较强的相互作用,植物活动形成了环境异质性,进而影响土壤空间异质性;Fraterrigo等^[66]对北卡罗来纳州南部森林历史上不同土地利用对不同尺度和小尺度空间结构的土壤养分均值和变异进行了研究,发现土地利用改变了土壤养分的空间异质性和其养分资源利用;闫海冰等^[67]研究表明,关帝山云杉更新苗的分布格局与土壤氮素空间变异具有一定的关联性;王政权等^[68]对阔叶红松林的研究得出,土壤水分具有明显的空间异质性,为土壤空间异质性与根系结构和生长提供了参考;刘少冲等^[69]对小兴安岭阔叶红松混交林一定面积的林隙土壤养分的空间异质性进行了研究,为林木更新奠定了基础。

1.4 生态化学计量学研究现状

碳、氮、磷是植物体发育、生长和存活的3种极其重要的营养元素,也是植物体生长发育的主要限制性营养元素,这些元素在植物体与植物体之间、植物体与环境之间相互作用,其作用不仅受到植物体对这些营养元素需求的影响,也受到环境中营养元素平衡状况的影响^[70]。不管是植物个体水平还是生态系统,碳、氮、磷营养元素都是相互作用的,这当中任何一种营养元素的改变都会打破这种稳定性并且影响到植物体的生长生存,其含量和分布特征有助于我们了解整个生态系统对碳、氮、磷营养元素的需要。