

基于遥感生态指数的黄河源生态环境质量评价

中文摘要

(作者: 李昕 指导教师: 杨长保)

“三江源”是长江,黄河,澜沧江的发源地,河流密布,湖泊沼泽众多,雪山冰川也广泛分布。三江源中青海省玛多县多石峡以上地区为黄河源,黄河是中国第二长河,是中华文明最主要的发源地。历史上,黄河源生态环境良好,物种丰富,但近几十年来,由于人类活动和全球变暖的影响,黄河源出现水土流失,草地退化等生态问题。国务院先后在 2005 年和 2011 年批准了《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》,并建立青海三江源国家生态保护综合试验区,而且在 2014 年开展了三江源保护和建设二期工程,旨在全面恢复三江源地区的生态环境。只有科学客观地对生态环境质量进行评价,并找出影响生态环境的驱动力因素,才能让人们对当地生态环境有更加清晰的认识,积极采取措施改善生态环境质量。

本文利用黄河源 2000 年,2010 年,2020 年 Landsat 遥感影像数据,通过提取绿度,湿度,干度,热度四个指标,利用主成分分析法集成各个指标,获得黄河源 2000 年,2010 年,2020 年的遥感生态指数分布图,并以 0.2 为间隔进行分级,将黄河源生态环境质量分为五个等级,进行分析和评价。在时间上,分析二十年间的生态环境质量变化,在空间上,以县域为基本的评价单元,分析不同地理位置生态环境质量的差异。然后利用地理探测器,选取土地利用类型,气温,降水,高程,坡度,人口密度,GDP 七个探测因子,探究影响因子与遥感生态指数的空间分异性以及两因子产生的交互作用。

通过分析和研究得到如下成果:

(1) 2000 年-2020 年,黄河源绿度指标逐渐升高,并从西北至东南逐渐上升;湿度指标变化不大,同样呈现由西北至东南逐渐上升的趋势;干度指标逐渐下降,由西北至东南不断下降;热度指标先上升后下降,热度较高区域集中在东南部。

(2) 黄河源 2000 年-2020 年生态环境质量逐渐变好,等级为优的区域面积占比在 20 年间由 14.39%上升到 16.66%,等级为良好的区域面积占比在 20 年间

由 17.16%上升到 25.87%，等级为一般的区域面积占比在 20 年间由 23.39%上升到 24.78%，等级为较差的区域面积占比在 20 年间由 22.73%下降到 18.11%，等级为差的区域面积占比在 20 年间由 22.33%下降到 14.58%。

(3) 利用地理探测器进行驱动因子探测后，土地利用类型，气温，降水，高程，坡度，人口密度，GDP 七个探测因子中，对遥感生态指数解释力度排序为：土地利用类型>降水量>气温>高程>人口密度>坡度>GDP。对其进行交互作用探测后，每两个因子间均产生增强作用，其中，气温 $\cap$ 降水，气温 $\cap$ 坡度，坡度 $\cap$ 人口密度，坡度 $\cap$ GDP 产生双因子非线性增强作用，其余两因子间均产生双因子增强作用。

关键词：

黄河源，生态环境质量评价，遥感生态指数，地理探测器，驱动因子

Ecological environmental quality assessment of the Yellow River source based on remote sensing ecological index

Abstract

(Author: Li Xin

Supervisor: Yang Changbao)

Three rivers source is the birthplace of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River. It has dense rivers, numerous lakes and marshes, and widely distributed snow mountains and glaciers. Among the three rivers source, the area above Duoshi Gorge in Maduo County of Qinghai Province is the source of the Yellow River, which is the second longest river in China and the most important birthplace of Chinese civilization. Historically, the source of the Yellow River had a good ecological environment and rich species. However, in recent decades, due to the impact of human activities and global warming, the source of the Yellow River has experienced ecological problems such as soil erosion and grassland degradation. In 2005 and 2011, The State Council approved the General Plan for Ecological Protection and Construction of the Three Rivers Source Nature Reserve in Qinghai Province, and established the Qinghai Three Rivers Source National Comprehensive Experimental Zone for Ecological Protection. In 2014, the second phase of the Sanjiangyuan Protection and Construction Project was launched, aiming to fully restore the ecological environment of the three rivers source. Only by evaluating the ecological environment quality scientifically and objectively, and finding out the driving forces affecting the ecological environment, can people have a clearer understanding of the local ecological environment and take active measures to improve the ecological environment quality.

In this paper, Landsat remote sensing image data of the Yellow River source in 2000, 2010 and 2020 were used to extract four indicators of greenness, wetness, dryness and heat, and principal component analysis method was used to integrate all the indicators to obtain the remote sensing ecological index distribution map of the Yellow River Source in 2000, 2010 and 2020, and the classification was conducted with an spacing of 0.2. The ecological environment quality of the source of the Yellow River is

divided into five levels to analyze and evaluate. In terms of time, the change of eco-environmental quality in the past 20 years is analyzed. In terms of space, the difference of eco-environmental quality in different geographical locations is analyzed based on the basic evaluation unit of county area. Then, geographical detector is used to select seven detection factors, namely land use type, temperature, precipitation, elevation, slope, population density and GDP, to explore the spatial differentiation between impact factors and remote sensing ecological index and the interaction between the two factors.

Through analysis and research, the following results are obtained:

(1) From 2000 to 2020, the greenness index of the Yellow River source increased gradually from northwest to southeast; Wetness index showed little change, and also showed a gradual upward trend from northwest to southeast. The index of dryness decreased gradually from northwest to southeast. The heat index rose first and then decreased, and the high heat area was concentrated in the southeast.

(2) From 2000 to 2020, the ecological environment quality of the Yellow River source has gradually improved. The area with excellent grade increased from 14.39% to 16.66% during 20 years, and the area with good grade increased from 17.16% to 25.87%. The area of the average grade increased from 23.39% to 24.78% in 20 years, the area of the poor grade decreased from 22.73% to 18.11%, and the area of the poor grade decreased from 22.33% to 14.58% in 20 years.

(3) After driving factor detection by geographic detector, among the seven detection factors of land use type, temperature, precipitation, elevation, slope, population density and GDP, the interpretation efforts of remote sensing ecological index were ranked as follows: land use type > precipitation > temperature > elevation > population density > slope > GDP. After the interaction detection, each two factors have the enhancement effect. Temperature $\cap$ precipitation, temperature $\cap$ slope, slope $\cap$ population density and slope $\cap$ GDP have the double factor nonlinear enhancement effect, while the other two factors have the double factor enhancement effect.

Keywords:

Yellow River source, ecological environmental quality assessment, remote sensing
ecological index, geographic detector, driving factor

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 生态环境质量评价	2
1.2.2 影响因素	3
1.3 研究内容与技术路线	4
1.3.1 研究内容	4
1.3.2 技术路线	5
第 2 章 研究区概况与研究数据	6
2.1 研究区概况	6
2.1.1 研究区地理位置	6
2.1.2 地形地貌特征	7
2.1.3 气候特征	7
2.1.4 水文概况	7
2.1.5 土壤	7
2.1.6 植被	7
2.1.7 野生动物	8
2.2 研究数据获取	8
2.2.1 Landsat 遥感影像数据	8

2.2.2	土地利用数据	9
2.2.3	气温和降水数据	9
2.2.4	DEM 高程数据	10
2.2.5	人口和 GDP 数据	11
2.2.6	其他数据	11
2.3	数据预处理	11
2.3.1	Landsat 遥感影像数据预处理	11
2.3.2	气象数据预处理	13
2.3.3	DEM 高程数据预处理	14
2.3.4	其他数据预处理	14
第 3 章	遥感生态指数的构建	15
3.1	遥感生态指数的构建	15
3.1.1	绿度指标	15
3.1.2	湿度指标	16
3.1.3	干度指标	16
3.1.4	热度指标	17
3.2	主成分分析	18
3.3	水体掩膜	19
3.4	遥感生态指数的计算	19
第 4 章	黄河源生态环境质量评价	21
4.1	各指标计算结果	21

4.1.1	绿度指标.....	21
4.1.2	湿度指标.....	23
4.1.3	干度指标.....	26
4.1.4	热度指标.....	28
4.2	主成分分析	30
4.3	黄河源生态环境质量计算结果	31
第 5 章	黄河源生态环境质量驱动因子分析.....	35
5.1	地理探测器原理	35
5.2	黄河源驱动因子	37
5.2.1	黄河源土地利用数据.....	37
5.2.2	黄河源气象数据.....	39
5.2.3	黄河源高程及坡度数据.....	41
5.2.4	黄河源人口密度和 GDP 数据.....	42
5.3	构建地理探测器	44
5.3.1	分异及因子探测.....	44
5.3.2	交互作用探测.....	45
第 6 章	结论与展望	48
6.1	结论	48
6.2	展望	49
参考文献		50
作者简介及科研成果		55

致谢.....	56
---------	----

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

“三江源”是长江，黄河，澜沧江的发源地，位于我国青海省南部。三江源地区河流密布，湖泊、沼泽众多，雪山冰川也广泛分布，是世界上水资源最为丰富的地区之一，素有“中华水塔”的美誉，也是保障我国生态安全的关键地区。三江源中青海省玛多县多石峡以上地区为黄河源，属湖盆宽谷带，盆地四周东有阿尼玛卿山，西有雅拉达泽山，北有布尔汗布达山脉，南以巴颜喀拉山与长江流域为界。黄河是中国第二长河，自西向东横跨青藏高原，内蒙古高原，黄土高原以及华北平原等四个地貌单元，发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地，是中华文明最主要的发源地。

历史上，三江源生态环境良好，湖泊分布广泛，是野生动植物良好的栖息地。近几十年来，由于人类的活动和全球气候变暖的影响，三江源地区出现水土流失，草地退化以及冰川减少等生态问题，已对我国黄河，长江，澜沧江的中下游乃至亚洲东部地区的生态安全构成严重威胁。但是由于三江源地区地表风化强烈，土层薄，质地粗，气候寒冷，生态系统恢复能力差，生态环境调节缓慢^[1]。为遏制三江源生态环境的进一步恶化，2005年1月26日国务院批准了《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》，采取退牧还草，生态移民等措施全面恢复三江源地区的生态环境，是一项惠及三大江河流域乃至全国的宏大工程。2011年11月16日，国务院常务会议决定建立青海三江源国家生态保护综合试验区。2014年初，三江源保护和建设二期工程启动，实施面积由原来的15.23万km²扩至39.5万km²，旨在进一步遏制生态恶化趋势。生态环境是人类赖以生存的物质基础，保护生态环境尤为重要。改善生态环境是可持续发展的必要条件之一，了解和评价生态环境状况是保护生态环境的前提和基础^[2]。只有科学客观地对生态环境质量进行评价，并找出影响生态环境的驱动力因素，才能让人们对当地生态环境有更加清晰的认识，积极采取措施改善生态环境质量。

遥感技术能够高效地获取大范围的实时监测数据，利用遥感数据来进行生态系统的监测与评价已成为生态环境质量研究的重要手段。结合遥感(RS)和地理信息(GIS)技术来评价生态环境质量，不仅能快速分析生态环境状况，也能对生态环境质量的时空演变趋势进行对比^[3]。黄河源作为三江源之一，对我国生态安全有着重要的作用。利用黄河源地区2000年，2010年，2020年三期遥感影像，对

黄河源地区生态质量进行评价,对黄河源生态环境质量变化进行时空变化分析,并对影响生态环境质量的因素进行研究,对于后续黄河源地区的生态治理和环境保护具有一定的积极意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 生态环境质量评价

近几十年来,由于人类活动和气候变化,生态系统不断退化,水土流失,草地退化等生态问题加剧,逐渐威胁到区域生态安全和可持续发展。为了积极应对日益严峻的环境问题,利用合理高效的生态环境质量评价方法对区域进行生态质量监测是十分必要的。遥感可以提供实时数据和大规模监测,利用遥感技术来进行生态环境质量评价是目前生态研究的有效手段。众多学者采取了多种不同的生态质量评价方法。

20世纪70年代,联合国经济合作组织提出了PSR模型,即压力-状态-响应模型,该模型一经提出,得到各国学者的应用与改进。2010年,Ness^[4]在PSR模型的基础上提出动因-压力-状态-影响-反应(DPSIR)模型。2014年,Bekats等人^[5]利用Landsat数据提取归一化植被指数,归一化建筑指数以及热度对生态环境质量进行评价。2015年,韦晶等人^[6]基于生态敏感性-生态恢复力-生态压力模型,利用气温,降水,地形,植被覆盖度等16个指标,将层析分析法和主成分分析法结合起来确定指标权重,计算生态环境脆弱性指数(EIVI)对三江源地区进行生态环境脆弱性指数的评价。2021年,Boori等人^[7]在PSR框架下,分别在压力模型选取12个指标,状态模型选取3个指标,以此计算获得响应指标,对萨马拉地区进行生态环境评价。

2006年,国家环境保护部颁发了《生态环境状况评价技术规范》^[8],利用生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数及污染负荷指数来计算生态环境状况指数(EI),对县级以上的区域进行生态评价。2012年,姚尧等人^[9]应用生态环境状况指数(EI)对全国范围进行生态环境质量评价,并将生态质量分为五个等级,具有很好的实用价值。2021年,朱艳等人^[10]依据此规范采用行政区生态环境状况评价和三种专题评价相结合的评价方法,对郑州市辖区的生态环境状况进行评价。同年,孙彩霞等人^[11]在生态环境状况指数的基础上提出

新生态环境指数 (NEI), 增强了结果的可视化和实时化。2022 年, 何正枫利用生态环境状况指数对兰州市的植被, 水域, 农田, 建筑用地等生态因素进行监测评价, 对兰州市环境质量变化进行了分析^[12]。

但是以上几种评价方法指标权重难以确定, 具有一定的主观性。2013 年, 徐涵秋^[13]提出了一个利用绿度, 湿度, 热度, 干度四个指标, 采用主成分分析法评价生态环境质量的方法。此方法完全基于遥感技术, 指标容易获取并避免人为主观设置权重的影响, 取得了广泛的认可和应用。2018 年, 刘盼等人^[14]利用 RSEI 模型, 计算四个评价指标, 对南瓮河自然保护区 1990-2015 年的生态环境质量进行评价。2020 年, Chao Yang 等人^[15]在 RSEI 的基础上进行改进, 利用植被覆盖率 (FC), 植被健康指数 (VHI), 归一化差异累积和裸土指数 (NDBSI), 地表湿度 (LSM) 和地表温度 (LST) 参数, 计算得到综合生态评价指数 (CEEI), 对粤港澳大湾区进行生态质量评价。同年, Jing 等人^[16]利用 Landsat5 和 Landsat8 影像计算艾比湖湿地国家级自然保护区的遥感生态指数, 并对生态环境质量进行了空间自相关分析。2021 年, Liao 等人^[17]利用 GEE 的 MODIS 数据, 在获取 RSEI 四个指标的基础上, 提出基于知识粒化熵的权重确定方法, 很好地反映了区域指标的空间分布。

1.2.2 影响因素

通过计算区域遥感生态指数来获得该地区生态环境质量的时空演变趋势以后, 找出影响其生态环境质量的因素同样重要。已有大量学者利用不同的研究方法探究能够对生态环境质量产生影响的因素。Huang 等人^[18]通过计算拉萨市的遥感生态指数 (RSEI) 与人口, 城镇人口, GDP, 人口密度, 城镇人口密度和人均 GDP 六项社会经济指标的相关系数, 探究社会经济因素对生态环境质量的影响。Gao 等人^[19]对 RSEI、NDVI、Wet、NDBSI、LST、降水、土地利用和区域生产总值 (RGP) 进行 Mantel 和 Pearson 相关分析, 来探究影响研究区内生态质量的因素。王丽霞等人^[20]通过建立多元线性回归方程, 探究影响延河流域生态质量的因素并分析 DEM 与生态质量的关系。Wang 等人^[21]开发了一个结合 Dyna-CLUE 模型和遥感生态指数的综合框架, 来探究多因素驱动的土地利用变化, 土地利用变化对生态质量产生的时空影响以及未来趋势。

虽然以上几种方法取得了较为实用的结果,但在对影响因素分析时,大部分均是基于相关性分析,回归分析和主成分分析等方法。这些方法忽略了影响因子与生态环境在空间上的关联,以及因子间交互作用对生态环境产生的影响。地理探测器是一种能够探测空间分异性的空间统计学方法,它不仅能揭示单个自变量对因变量的直接影响,还能够探测两自变量之间交互作用的方式和对因变量产生的影响,揭示自变量对因变量空间分布的解释能力^[22]。

王欢等人^[23]基于 GIS 和 RUSLE 模型模拟土壤侵蚀,结合高程,坡度,降雨,岩性,植被覆盖度以及土地利用等影响因子,应用地理探测器对喀斯特地貌类型进行土壤侵蚀的定量归因研究。Deng 等人^[24]选取海拔,土地利用类型,土壤类型,地貌等七个因素,利用地理探测器探究其对北京市生态环境质量的解释程度。2020 年,高焕霖等人^[25]选取气候及植被因子、地形及土壤因子、人类活动因子,以及模型结构因子这四类影响因素,揭示生态环境质量空间分布格局的影响因素及其交互作用。2022 年,Zhou 等人^[26]在对太湖流域进行生态环境质量评价之后,选取地形,气候,土地利用,社会经济因素等七个因素,利用地理探测器,分析其与遥感生态指数的关系以及因子间的交互作用,揭示太湖流域遥感生态指数空间异质性的形成机制。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

由于人类的活动和全球气候变暖的影响,黄河源地区的生态环境发生变化,需要寻找合适的生态环境评价方法对其进行分析研究,并探究影响其生态环境发生变化的因素。遥感生态指数采用绿度,湿度,干度,热度四个指标进行计算,不仅完全基于遥感技术,而且指标易于获取。其采用主成分分析法确定权重,避免了以往人为确定权重的主观性。由于地理探测器能够很好地探测空间异质性,并能获取两个自变量之间的相互作用关系,在对黄河源进行生态环境质量评价之后,再利用地理探测器进行影响因素的分析。

本文利用黄河源 2000 年,2010 年,2020 年的 Landsat 遥感影像数据,在进行预处理之后,提取研究区内的绿度,湿度,干度,热度四个指标,在进行水体掩膜后,利用主成分分析法来集成各个指标,获得黄河源 2000 年,2010 年,2020

年三期遥感生态指数分布图，以 0.2 为间隔进行分级，将黄河源生态环境质量分为五个等级，进行分析和评价。在时间上，分析这二十年间的生态环境质量变化，在空间上，以县域为基本的评价单元，分析不同地理位置生态环境质量的差异。然后，利用地理探测器，选取土地利用，温度，降水，高程，坡度，人口密度，GDP 七个因子，探究影响因子与遥感生态指数的空间分异性以及两个因子产生的交互作用。

1.3.2 技术路线

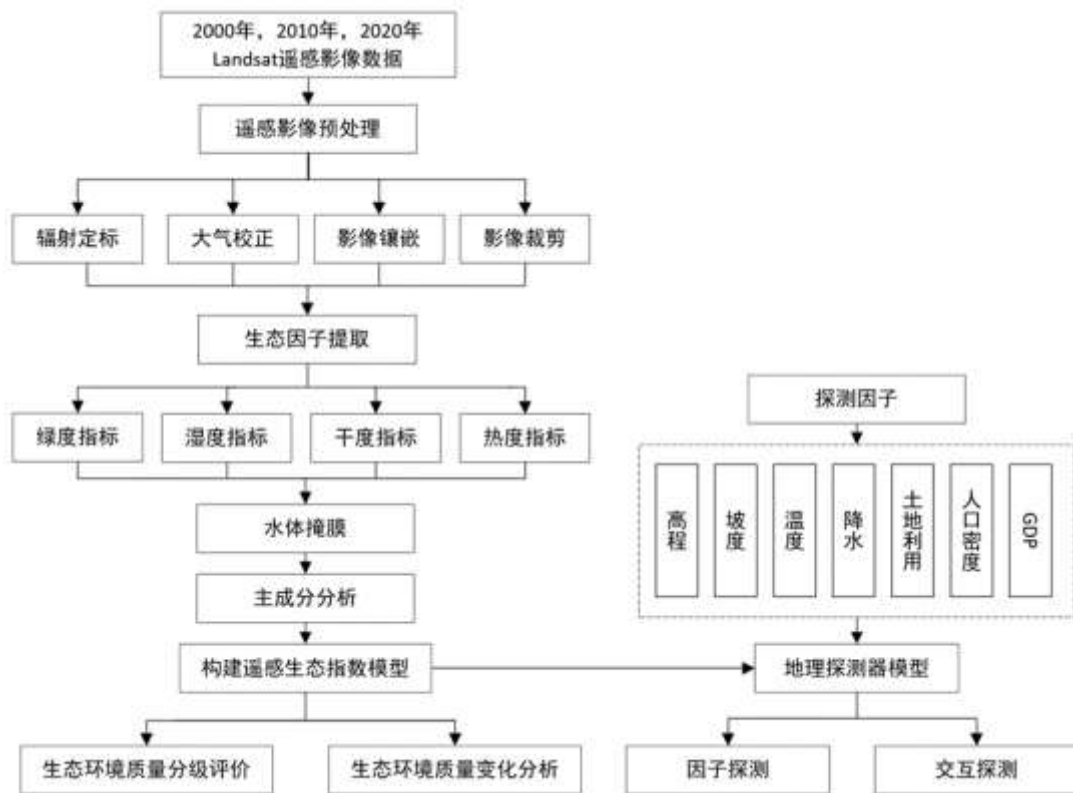


图 1.1 技术路线图

第2章 研究区概况与研究数据

2.1 研究区概况

2.1.1 研究区地理位置

“三江源”是长江，黄河，澜沧江的发源地，位于我国西部，青海省南部。三江源东，东南部与甘肃省和四川省相邻，北部与可可西里国家级自然保护区以及格尔木市和都兰县交界，东北部与共和县，贵南县和同仁县接壤，南部，西部与西藏自治区相接。三江源总面积约为 37.48 万 km^2 。三江源不仅是世界上水资源最为丰富的地区之一，也是世界上海拔最高、面积最大、湿地类型最丰富的地区，有“中华水塔”的美誉。

黄河源位于三江源的东部，地理位置 $32^{\circ} 22' - 37^{\circ} 6' \text{ N}$, $95^{\circ} 44' - 102^{\circ} 20' \text{ E}$ ，面积约 15.06 万 km^2 。黄河源包括黄南藏族自治州的尖扎县，同仁县，泽库县，河南蒙古族自治县四县，海南藏族自治州的共和县，贵德县，贵南县，兴海县，同德县五县，果洛藏族自治州的玛多县，玛沁县，甘德县，久治县，达日县，班玛县六县以及玉树藏族自治州中曲麻莱县和称多县的一部分。

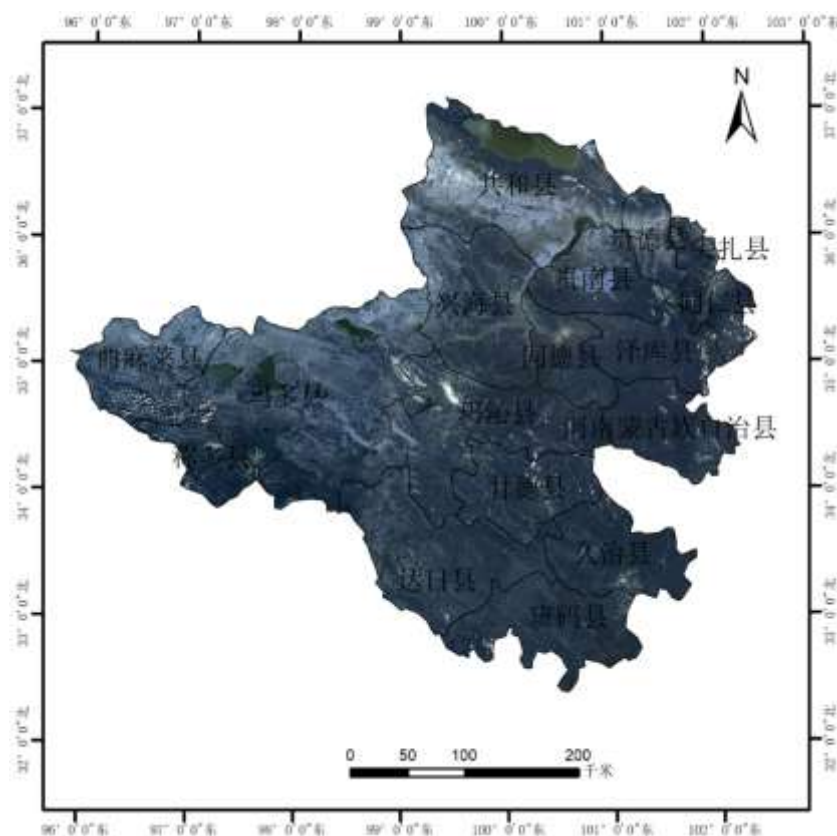


图 2.1 黄河源区域位置图

2.1.2 地形地貌特征

三江源以山地地貌为主要的地貌类型，山脉众多，群山高耸，海拔在 3335m-6564m 之间，海拔 5000m 以上分布着冰川地貌。三江源从西到东地势递减，长江源，澜沧江源地貌类型以高山地貌，高平原丘陵地貌和冰川地貌为主，黄河源相对海拔较低，主要有高原地山地丘陵地貌，湖盆地貌以及河谷地貌类型等等。

2.1.3 气候特征

黄河源为典型的高原大陆性气候，属于青藏高原气候系统，年温差小，日温差大，冷热两季交替，干湿两季分明，但是季节变化特征不明显。冷季长达七个月，主要受青藏冷气压控制，不仅热量低，而且降水很少。暖季由于西南季风的影响，产生热气压，降水量丰富，约占全年降水量的 75%。

2.1.4 水文概况

三江源河网密布，大小河流超过 180 多条，河流面积约为 1600km² 黄河发源于青海省巴颜喀拉山北麓约古宗列盆地西隅，源头海拔 4724m，是我国第二大河，主要支流有多曲，热曲等。黄河流经四川省，青海省，甘肃省，宁夏省，内蒙古自治区，陕西省，山西省，河南省，山东省九省（自治区），最后注入渤海。在黄河的源头段分布着众多湖泊和沼泽湿地，是中国最大的天然沼泽分布区，主要类型包括三叶碱毛茛沼泽和杉叶藻沼泽，大部分均属于泥炭土沼泽。在黄河源同样分布着丰富的冰川资源，冰川类型属于大陆性山地冰川。

2.1.5 土壤

黄河源由于海拔差异较大，形成明显的土壤垂直地带性分布规律。海拔由高到低，土壤类型也各不相同，依次为高山寒漠土，高山草甸土，高山草原土，山地草甸土，灰褐土，栗钙土以及山地森林土。分布最为广泛的是高山草甸土，沼泽化草甸土次之。

2.1.6 植被

黄河源植被种类丰富，可以分为十四个群系纲，五十个群系。黄河源主要包括的植被类型有针叶林，阔叶林，针阔混交林，灌丛，草甸，草原，沼泽以及水生植被，垫状植被以及稀疏植被，并且分布着大面积的高山冰缘植被。由于黄河源地表热量以及湿度由东南到西北递减，植被的主要种类也随着地域的不同出现

高原地带性，主要优势种类为高寒草甸和高寒草原。

2.1.7 野生动物

三江源野生动物区系属于“青海藏南亚区”，分为高原高寒动物区系和寒温带动物区系，动物分布型属于“高地型”，以青藏类为主要的类型，还有一部分中亚型及广布种分布。三江源有国家重点保护动物六十九种，包括藏羚，野牦牛，藏原羚，艾虎，沙狐等。其中包括国家一级重点保护动物十六种，国家二级重点保护动物五十三种，省级保护动物三十二种。

三江源有 85 种兽类^[27]，占青海省兽类的 82.5%，分为 62 种古北界，16 种东洋界，3 种待确定。国家重点保护兽类 29 种，其中，国家一级重点保护种类 9 种，国家二级重点保护种类 20 种。三江源有 237 种鸟类，占青海省鸟类的 77%，分为 178 种古北界，14 种东洋界，45 种广布种。国家重点保护鸟类有 39 种，其中，国家一级重点保护种类为 7 种，国家二级重点保护种类为 32 种。两栖爬行类 15 种，占全国两栖爬行类的 2%。其中两栖类 7 种，爬行类 8 种，有国家二级重点保护种类 1 种，还有已鉴定昆虫 11 目 87 科 378 种。

2.2 研究数据获取

研究数据的获取包括遥感影像数据，黄河源边界数据，DEM 高程数据，土地利用数据，人口密度数据，GDP 数据，气温和降水数据。

2.2.1 Landsat 遥感影像数据

由于本研究涉及时间范围从 2000 年-2020 年，时间跨度较大，Landsat 遥感影像可以提供较长时间范围的数据，可以较好地满足实验要求。本研究所用的遥感数据来源于美国地质调查局（United States Geological Survey，<https://earthexplorer.usgs.gov/>）网站，2000 年和 2010 年采用 Landsat5 遥感影像数据，2020 年采用 Landsat8 遥感影像数据。为使研究数据具有一致性，选取数据均集中在不同年份的 7-9 月，且选取质量高，云量小于 1% 的数据。

自 1972 年 7 月 23 日以来，美国 NASA 已发射 8 颗陆地卫星，Landsat1-4 相继失效，Landsat5 于 1984 年 3 月 1 日从加利福尼亚范登堡空军基地发射，携带多光谱扫描仪（MSS）和专题制图仪（TM），为地球陆地表面提供了 28 年零 10 个月的高质量全球数据。Landsat8 于 2013 年 2 月 11 号发射，携带陆地成像仪（OLI）和热红外传感器（TIRS）。

本文下载 USGS 上 Collection 1Level1 类型数据, 该数据使用地面控制点和数字高程模型进行了高精度正射校正。

2.2.2 土地利用数据

本文利用的土地利用数据下载于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 来源于中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)^[28], 此数据集构建由中国科学院地理科学与资源研究所牵头, 联合中国科学院遥感应用研究所、东北地理与农业生态研究所、武汉测量与地球物理研究所、新疆生态与地理研究所、寒区旱区环境与工程研究所、成都山地灾害与环境研究所等多家单位共同完成。数据集包括 1980 年, 1990 年, 1995 年, 2000 年, 2005 年, 2008 年, 2010 年, 2013 年, 2015 年, 2018 年和 2020 年 11 期, 本文利用的数据为 2020 年 30m 分辨率土地利用数据。

2.2.3 气温和降水数据

数据来源于国家青藏高原科学数据中心^[29], 国家青藏高原科学数据中心依托中国科学院青藏高原研究所建设, 负责青藏高原数据的收集, 存储, 管理, 集成, 分析和应用。平台包含数据集 5693 个, 其中开放数据集 3720 个, 包含泛第三极野外台站, 泛第三极环境变化与丝绸之路建设, 第二次青藏高原综合科学考察研究, 黑河流域数据专题, 祁连山地区天空地一体化综合监测网专题, 青海省专题, 中国高分辨率高质量近地表空气污染物数据集, 三江源国家公园等多个有实用价值的数据集。

数据集为三江源及邻近区域国家标准气象站逐月气象数据, 该数据集包含 32 个气象站数据, 主要内容有平均本站气压、极端最高本站气压、极端最高本站气压出现日、极端最低本站气压、极端最低本站气压出现日、平均气温、极端最高气温、极端最高气温出现日、极端最低气温、极端最低气温出现日、平均气温距平、平均最高气温、平均最低气温、日照时数、日照百分率、平均相对湿度、最小相对湿度、最小相对湿度出现日期、降水量、日降水量 $\geq 0.1\text{mm}$ 日数、最大日降水量、最大日降水量出现日、降水距平百分率、平均风速、极大风速、极大风速之出现日、最大风速、极大风速之风向、最大风速之风向、最大风速之出现日 26 个变量。

由于本文研究区域为黄河源, 包含恰卜恰, 贵州, 兴海, 贵南, 同仁, 玛多,

果洛，达日，河南，久治，班玛 11 个气象站，并且使用的气象数据为平均气温和降水量两个数据。

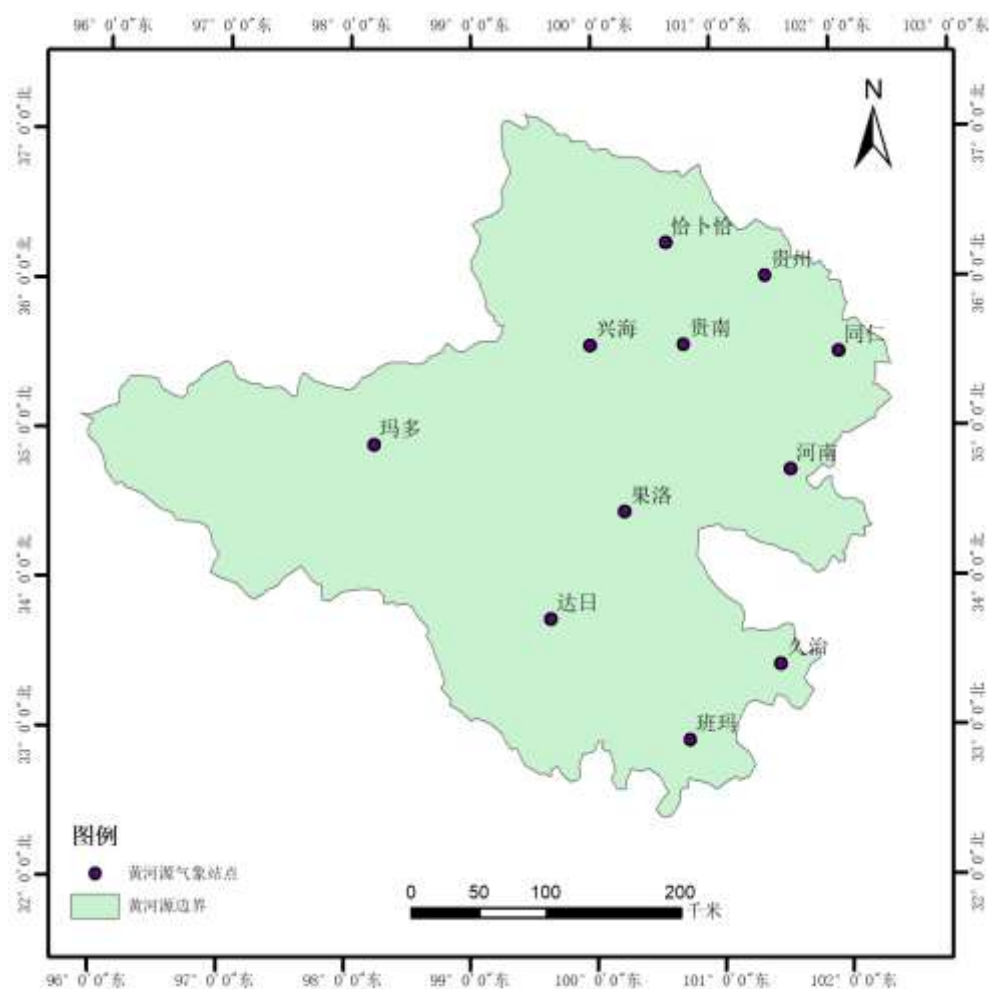


图 2.2 黄河源气象站点分布图

2.2.4 DEM 高程数据

本文利用的高程数据为 ASTER GDEM V2 30m 数据，来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>)^[30]。ASTER GDEM 数据由日本 METI 和美国 NASA 联合研制并免费面向公众分发，它基于“先进星载热发射和反辐射计(ASTER)”数据计算生成，是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率高程影像数据。2009 年 6 月 29 日 V1 版 ASTER GDEM 数据发布，为全球对地观测提供了基础数据，但是由于 ASTER GDEM V1 原始数据局部地区出现异常，由其加工而成的数据产品也存在异常，所以 ASTER GDEM V2 版将算法进行了改进，在此基础上，数据的空间分辨率和高程的精度都有了不同程度的提升，准确度也有了较大的改进。改进算法重新处理了 150 万幅影像，其中的 25 万幅是在 V1 版 GDEM 数据发布

后新获取的影像。ASTER GDEM V2 全球数字高程数据于 2015 年 1 月 6 日正式发布, 分辨率为 30m。

2.2.5 人口和 GDP 数据

本文利用的人口和 GDP 数据下载于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)^[31-32], 来源于中国人口空间分布公里网格数据集和中国 GDP 空间分布公里网格数据集。中国人口空间分布公里网格数据集反映了人口在全国范围内的空间分布状况, 为 1km 栅格数据。中国 GDP 空间分布公里网格数据集是在全国分县 GDP 统计数据的基础上, 对与人类活动密切相关的土地利用类型, 居民点密度以及夜间灯光亮度等因素空间插值生成的 1km 栅格数据。

2.2.6 其他数据

本文所用的黄河源边界数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。

2.3 数据预处理

2.3.1 Landsat 遥感影像数据预处理

辐射定标

辐射定标是指将传感器记录的电压或数字量化值(DN 值)转化为绝对辐射亮度值或与地表反射率, 表面温度等有关的相对值的过程, 按照用途可分为绝对定标和相对定标。对于线性传感器, 绝对定标利用标准辐射源, 通过公式建立辐射亮度值 L_λ 与数字量化值(DN)之间的定量关系:

$$L_\lambda = Gain * DN + Offset \dots\dots\dots(2.1)$$

辐射亮度值 L_λ 常用的单位为 $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ 。当定标为反射率时, 反射率分为大气外层表观反射率和地表真实反射率。

相对定标是指某确定场景中各像元, 探测器, 波段之间在不同时间测得的辐射度量相对值。

大气校正

大气校正就是为了消除光照和大气中水蒸气, 氧气, 二氧化碳, 大气分子, 气溶胶散射等因素对地物反射的影响, 从而获得地物反射率、辐射率、地表温度等真实物理模型参数, 反演地物真实的反射率。

大气校正分为绝对大气校正方法和相对大气校正方法。绝对大气校正方法是指将遥感图像的数字量化值（DN 值）转化为地表反射率，地表辐射率和地表温度的方法。常用的方法主要包括基于辐射传输模型的 MORTAN 模型，LOWTRAN 模型，ATCOR 模型，6s 模型，基于简化辐射传输模型的黑暗像元法以及基于统计学模型的反射率反演。相对大气校正方法无法得到真实的地物反射率，仅以图像上相同的数字量化值（DN 值）表示相同的地物反射率。常用的方法有基于统计的不变目标法和直方图匹配法。本文所采用的大气校正方法为基于 MODTRAN5 辐射传输模型的 FLAASH 大气校正工具。MODTRAN 模型由 Spectral Sciences, Inc 和美国空军实验室（Air Force Research Laboratory）共同研发的，由 Exeils VIS 公司负责集成和 GUI 设计。该算法精度高，仅通过遥感影像的光谱特征来估计大气属性，不需要获得成像时的大气参数。FLAASH 还可以有效地去除气溶胶散射效应，同时在像素的尺度上，将目标像元和邻近像元由于交叉辐射而产生的“邻近效应”加以校正，并且能够对波谱噪声进行平滑处理，还可获得额外的能见度和水汽含量数据，在遥感数据处理方面得到广泛的应用。

FLAASH 算法的原理为基于太阳波谱范围内（不包括热辐射）和平面朗伯体（或近似平面朗伯体），在传感器处接收的像元光谱辐射亮度公式为

$$L = \left(\frac{A * \rho}{1 - \rho_e * S} \right) + \left(\frac{B * \rho_e}{1 - \rho_e * S} \right) + (L_a) \dots \dots \dots (2.2)$$

式中，L 为传感器处像元接收到的总辐射亮度； ρ 为像素表面反射率； ρ_e 为像素周围平均表面反射率；S 为大气球面反照率； L_a 为大气后向散射辐射率；A 和 B 为取决于大气条件和几何条件的两个系数。

利用 FLAASH 来进行大气校正主要有三个步骤：

- （1）从图像中获取能见度，气溶胶类型和大气水汽含量等大气参数。
- （2）根据大气辐射传输方程得到反射率数据。
- （3）利用图像中光谱平滑的像元对整幅图像进行平滑运算，从而达到消除纠正中存留的噪声的目的。

FLAASH 还能自动判断出图像中受到云的影响而降低反射率的区域，从而在校正过程中用图像的平均辐射率来代替云区的辐射率，具有更高的准确性，有利于后续对图像的处理。

图像镶嵌

由于研究区涉及面积 15.06 万 km²，单幅遥感影像面积过小，无法覆盖整个研究区域，研究用到 15 景 2000 年 Landsat5 遥感影像数据，15 景 2010 年 Landsat5 遥感影像数据，12 景 2020 年 Landsat5 遥感影像数据，每一年份的遥感影像数据均需进行影像的镶嵌。

图像镶嵌是指在数学基础控制下，把多景相邻遥感影像拼接成一个大范围，无缝图像的过程。镶嵌功能可以对影像进行透明处理，匀色，羽化等功能，接边线常选择重叠区的河流、道路等地物。镶嵌还可以将图像的接边线或者重合边缘按照一定像素的距离进行均衡化处理，也就是镶嵌的羽化功能。除此之外，镶嵌还可以对遥感影像进行颜色平衡，以其中一幅遥感影像为基准，统计各幅影像的直方图以匹配其他镶嵌图像。使其灰度特征相近。

影像裁剪

将影像镶嵌完成之后，需要根据研究区范围对镶嵌影像进行裁剪。

2.3.2 气象数据预处理

由于获取到的气象数据包括在三江源范围内的气象站点，首先需要筛选出地理位置在黄河源范围内的气象站点，共包含恰卜恰，贵州，兴海，贵南，同仁，玛多，果洛，达日，河南，久治，班玛 11 个气象站。由于数据集包含三江源每年 1-12 月气象数据，为月度数据，而本文选取的遥感影像均在 7-9 月之间，所以需要计算 7-9 月平均气温和降水量的平均值，采取取三月份平均值的方法获得所在区域的平均气温和降水量。

计算出 11 个气象站点 7-9 月平均气温和降水量后，将其赋值给每个站点，由于有些区域，比如曲莱麻县，称多县，同德县，泽库县，尖扎县等没有气象站点，需要对研究区域进行克里金插值，使整个研究区域均有气象数据的赋值，并将矢量数据转化成栅格数据。

克里金法依据协方差函数对随机过程进行空间建模和预测，在随机过程中，克里金法能够给出最优线性无偏估计。克里金法在 1963 年由法国统计学家 Georges Matheron 提出，他将克里金法定义为“对已知样本加权平均以估计平面上的未知点，并且使估计值与真实值数学期望相同，方差最小的地统计学过程。克里金法分为普通克里金，改进算法（泛克里金，协同克里金，折取克里金），

混合算法（回归克里金，神经网络克里金，贝叶斯克里金）。本文对气象数据采取普通克里金法进行插值。

2.3.3 DEM 高程数据预处理

由于研究区面积大，范围广，共需下载 28 景 ASTER GDEM V2 30m 数据，需要对对这 28 景 DEM 高程数据进行镶嵌，并且根据研究区范围进行裁剪，在此基础上，再进行后续的高程和坡度数据的提取。

2.3.4 其他数据预处理

由于下载的土地利用数据，人口数据，GDP 数据均基于青海省或三江源区域，对于本文研究区域黄河源，均需进行掩膜处理。

第3章 遥感生态指数的构建

遥感生态指数 (RSEI) 利用绿度, 湿度, 干度, 热度四个指标来反映生态条件的优劣, 常常被用于评价生态系统^{[33]-[36]}, 分别采用植被指数, 湿度分量, 裸土指数以及地表温度来表示, 即

$$RSEI = f(\text{Greenness}, \text{Wetness}, \text{Heat}, \text{Dryness}) \dots\dots (3.1)$$

其遥感定义为:

$$RSEI = f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{NDSI}, \text{LST}) \dots\dots\dots (3.2)$$

式中: Greenness 为绿度; Wetness 为湿度; Heat 为热度; Dryness 为干度; NDVI 为植被指数; WET 为湿度分量; NDSI 为裸土指数; LST 为地表温度。

RSEI 指数中, 植被指数 NDVI 与 EI 指数中的植被覆盖指标含义类似, 与生物丰度指标也关系密切; 代表湿度的 WET 指标与 EI 指数中的水网指数指标相同, 但在 RSEI 中的湿度 WET 指标既可以代表开放水体, 还可代表土壤与植被的湿度。代表干度的 NDSI 指标与 EI 指数中的土地退化指标密切相关。由此可以得出, RSEI 中的三个指标与 EI 指数中的四个指标密切相关^[8]。

3.1 遥感生态指数的构建

3.1.1 绿度指标

绿度指标由归一化差值植被指数 NDVI 来表示。植被指数最早从 1969 年开始发展, Jordan 提出比值植被指数 (RVI), 后来有人提出了差值植被指数 (DVI), Deering 在 1978 年提出归一化差值植被指数 NDVI。NDVI 是利用植物叶面在红光波段的吸收和近红外波段的反射特性进行组合形成, 与叶面积指数 (LAI), 植物生物量和植被覆盖度相关^[37], 得到了广泛的应用。并且, NDVI 还可以在在一定程度上消除部分外力因素造成的辐射误差, 提高对植被覆盖度监测的准确性^[38]。因此以归一化差值植被指数 NDVI 作为绿度指标。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \dots\dots\dots (3.3)$$

式中: ρ_{NIR} , ρ_R 分别代表近红外和红光波段的反射率。

3.1.2 湿度指标

湿度指标：缨帽变换（Tasseled Cap Transform, TCT），也称 K-T 变换，在 1976 年由 Kauth 和 Thomas 提出，他们在研究植被生长的过程中发现，MSS 图像四个波段组成的四维空间中，植被的光谱点数据呈缨帽状规律分布，就将这种变换命名为缨帽变换。缨帽变换实现了对数据的压缩和去冗余，在生态监测中具有重要的作用，缨帽变换获得的湿度分量与植被，水体和土壤的湿度状况密切相关，因此以缨帽变换获得的湿度分量作为湿度指标。对于 Landsat 5 TM 和 Landsat8 OLI 的湿度提取公式^{[39]-[41]}分别为：

$$WET_{TM} = 0.0315\rho_B + 0.2021\rho_G + 0.3102\rho_R + 0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR_1} - 0.6109\rho_{SWIR_2} \quad \dots\dots(3.4)$$

$$WET_{OLI} = 0.1511\rho_B + 0.1973\rho_G + 0.3283\rho_R + 0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR_1} - 0.4559\rho_{SWIR_2} \quad \dots\dots(3.5)$$

式中： WET_{TM} ， WET_{OLI} 分别代表 Landsat 5 TM 和 Landsat8 OLI 的湿度分量。 $\rho_B, \rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR_1}, \rho_{SWIR_2}$ 分别代表影像在蓝，绿，红，近红外，短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率。

3.1.3 干度指标

由于水土流失的作用，地表出现裸土地，土地的生产力遭到破坏，生态安全受到威胁，裸土指数（SI）^[42]指示着地表水土流失的“干化”情况。建筑用地，例如屋顶，水泥路，停车场等使地表与地下水形成阻断，导致地表出现“干化”，建筑指数（IBI）^[43]指示着建筑用地的“干化”情况。因此干度指标由裸土指数（SI）和建筑指数（IBI）组合而成。

$$NDSBI = \frac{IBI + SI}{2} \quad \dots\dots(3.6)$$

其中

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR_1} + \rho_R) - (\rho_{NIR} + \rho_B)}{(\rho_{SWIR_1} + \rho_R) + (\rho_{NIR} + \rho_B)} \quad \dots\dots(3.7)$$

$$IBI = \left(\frac{2\rho_{SWIR_1}}{\rho_{SWIR_1} + \rho_{NIR}} - \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} - \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR_1}} \right) / \left(\frac{2\rho_{SWIR_1}}{\rho_{SWIR_1} + \rho_{NIR}} + \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR_1}} \right) \quad \dots\dots(3.8)$$

式中： $\rho_B, \rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR_1}$ 分别代表影像在蓝，绿，红，近红外，短波红外 1 波段的反射率。

3.1.4 热度指标

热度指标用地表温度来表示。

对于 Landsat5 TM6 波段，先根据辐射定标参数将灰度值转换为辐射亮度值，再利用 Planck 辐射函数计算得出像元亮度温度，最后借助比辐射率将其转换为地表温度，Landsat5 TM6 波段的地表温度提取公式如下，根据 Landsat 用户手册^[44]以及 Chander 等人修订的参数^[45]来计算：

$$L_6 = \text{gain} \times DN + \text{bias} \dots\dots\dots(3.9)$$

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6} + 1\right)} \dots\dots\dots(3.10)$$

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \frac{\lambda T_b}{\alpha} \ln \varepsilon_6} \dots\dots\dots(3.11)$$

式中： L_6 为 TM6 热红外波段在传感器处的辐射值，DN 为灰度值，gain 和 bias 分别表示 TM6 热红外波段的增益和偏置值， T_b 为传感器处温度， K_1 ， K_2 为定标参数， K_1 取值为 $607.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ， K_2 取值为 1260.56 K ， ε_6 为 TM6 热红外波段的地表比辐射率， T_s 为地表温度， λ 为 TM6 热红外波段的中心波长，取值为 $11.5 \mu\text{m}$ ， α 取值为 $1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。

对于 Landsat8，利用热红外波段 10 来进行计算地表温度。先对波段 10 进行辐射定标，得到其辐射亮度值，再利用普朗克定律反函数计算得出 T_s ^{[46]-[48]}：

$$L_{10} = \tau_{10} \left[\varepsilon_{10} B_{10}(T_s) + (1 - \varepsilon_{10}) I_{10}^{\downarrow} \right] + I_{10}^{\uparrow} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$T_s = \frac{C_1}{\lambda_{10} \ln \left\{ C_2 / \left[\lambda_{10}^5 (L_{10} - I_{10}^{\uparrow} - \tau_{10} (1 - \varepsilon_{10}) I_{10}^{\downarrow} / \tau_{10} \varepsilon_{10}) \right] + 1 \right\}} \dots\dots\dots(3.13)$$

式中： L_{10} 为传感器处的辐射亮度值，经过辐射定标来获取， τ_{10} 为大气在热红外波段 10 的透过率， ε_{10} 为地表比辐射率， $I_{10}^{\downarrow}$ 和 $I_{10}^{\uparrow}$ 分别表示大气向上和向下的辐射亮度， $B_{10}(T_s)$ 是与 T_s 相同的黑体的热辐射亮度， C_1 ， C_2 为常数，取值分

别为 $14387.7 \mu\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$ 和 $1.19108 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, ε_{10} 为波段 10 的地表比辐射率, T_s 为地表温度, λ 为波段 10 的中心波长, 取值为 $10.9 \mu\text{m}$ 。

3.2 主成分分析

主成分的概念首先由 Karl parson 在 1901 年引进, 但是当时只是根据非随机变量来讨论, 1993 年 Hotelling 将这个概念推广到了随机向量。

在多元统计中, 经常需要研究多变量问题, 多数情况不同指标之间具有一定的相关性, 这会在一定程度上增加分析问题的复杂性。主成分分析是将原来的指标进行重新组合, 使其成为一组互相无关的几个指标, 同时从中选取几个能够在最大程度上代替原指标信息的指标来反映原指标信息, 这种分析方法叫主成分分析法, 这也是统计学中常用的数据分析方法。

主成分分析基本原理是将原始空间坐标轴进行旋转, 把多数冗余复杂的指标转化成少数综合指标, 常用于高维数据的降维, 并且使原始各项指标中的大部分信息在获得的少数综合指标 (即主成分) 中体现, 使各维度的变量复杂度降低, 主成分分析后的各指标具有代表性。主成分分析可以在最大程度上反映原始信息, 又能降低指标维数^[49]。

假设矩阵 X 由 $n\times P$ 阶构成, 其中指标数量为 $P(X_1, X_2, \dots, X_p)$, 且各对象均由 P 个指标构成。

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.14)$$

主成分分析将原有的 P 个观测变量 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 综合, 形成 $F_1, F_2, \dots, F_m (m < p)$ 为新变量, 即主成分变换后得到的主分量, 各变量表示如下:

$$\begin{cases} F_1 = a_{11} * Zx_1 + a_{12} * Zx_2 + \dots + a_{1p} * Zx_p \\ F_2 = a_{21} * Zx_1 + a_{22} * Zx_2 + \dots + a_{2p} * Zx_p \\ \dots \\ F_m = a_{m1} * Zx_1 + a_{m2} * Zx_2 + \dots + a_{mp} * Zx_p \end{cases} \dots\dots (3.15)$$

主成分系数矩阵 $T=(a_{ij})_{m \times p}$, 且 $a_{11}+a_{12}+\dots+a_{1p}=1, (i=1, 2, \dots, m); F_i, F_j (i, j=1, 2, 3, \dots, m, i \neq j)$ 相关系数为 0; 根据统计学, 随着主成分方差减小, 包含信息越少, 贡献率也越低; 但是, 若数据方差较大, 数据分布较为离散, 数据被保留下来的信息越充分, 贡献率也越高。所以, 选取主成分的个数根据贡献率的大小来确定。

3.3 水体掩膜

McFeeters^[50]在 1996 年提出归一化差异水体指数 (NDWI),用于描述开阔水域特征并增强其在遥感数字图像中的存在。NDWI 利用反射的近红外辐射和可见光绿色来增强这些特征的存在,同时消除土壤和陆地植被特征的存在。

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \dots\dots\dots(3.16)$$

式中, Green 代表绿光波段, NIR 代表近红外波段。这个公式利用了水体的反射率从可见光到中红外波段减弱,在近红外和中红外波段吸收最强,而植被在近红外波段反射率最强,绿光与近红外波段的比值可以抑制植被信息,所以 NDWI 指数可以较好地突出影像中的水体信息,抑制影像中的植被信息^[51]。当计算遥感影像的 NDWI 值时,水体为正值,植被为零或负值。

然而,NDWI 并没有考虑到土壤和建筑物的反射特征,其与水体无法完全分离开。徐涵秋在 2005 年提出改进归一化差异水体指数,即 MNDWI:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \dots\dots\dots(3.17)$$

该指数将 NDWI 中的近红外波段替换成了中红外波段,与 NDWI 相比具有更加丰富的信息,可以消除地形差异的影响,对于水体的提取准确性也更高,因此本实验利用 MNDWI 指数进行水体的掩膜。

3.4 遥感生态指数的计算

先将绿度,湿度,干度,热度四个指标进行标准化处理,将数值统一映射在 [0,1]区间,采用公式为:

$$NI = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \dots\dots\dots(3.18)$$

式中: NI 为标准化后的指标值, I 为该项指标的数值, I_{max} 和 I_{min} 分别为该指标的最大值和最小值。

然后对标准化后的四个指标进行主成分分析,为了能够使 PC1 大的数值代表生态条件较好的区域,用 1 减去 PC₁,得到 RSEI₀,这是最原始的遥感生态指数,同样需要对其进行标准化处理。

$$RSEI_0 = 1 - \{PC_1[f(NDVI, WET, NDSI, LST)]\} \dots\dots\dots(3.19)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0-\min}) / (RSEI_{0-\max} - RSEI_{0-\min}) \dots\dots\dots (3.20)$$

式中：RSEI 代表遥感生态指数，其值在[0,1]之间。RSEI 的值越高，代表生态环境质量越好。RSEI 的值越低，代表生态环境质量越差。

第4章 黄河源生态环境质量评价

4.1 各指标计算结果

4.1.1 绿度指标

由表 4.1 可知，从 2000 年到 2010 年，黄河源 NDVI 平均值从 0.277 上升到 0.308，从 2010 年到 2020 年，黄河源 NDVI 平均值从 0.308 上升到 0.620，20 年间黄河源 NDVI 值不断上升，标准差从 0.340 上升到 0.365 又下降到 0.290，说明整个区域的分布较为稳定。这说明 20 年间，黄河源植被覆盖率不断增加，2000 年-2010 年增加幅度较小，2010 年-2020 年植被覆盖率上升较多，这说明我们国家长期在三江源地区采取的保护环境，植被修复的政策起到了实效，黄河源植被覆盖率显著提高。

表 4.1 黄河源 2000 年-2020 年归一化差值植被指数（NDVI）统计表

年份	2000	2010	2020
均值	0.277	0.308	0.620
标准差	0.340	0.365	0.290

图 4.1-4.3 为黄河源 2000 年-2020 年 NDVI 分布图，可以看出，NDVI 分布从西北至东南呈现逐渐上升的趋势。西北部的曲麻莱县，称多县，玛多县，兴海县，共和县植被覆盖率较低，中部的贵德县，贵南县，达日县植被覆盖率中等，东南部的同仁县，泽库县，久治县，河南蒙古族自治县，班玛县等植被覆盖率较高。

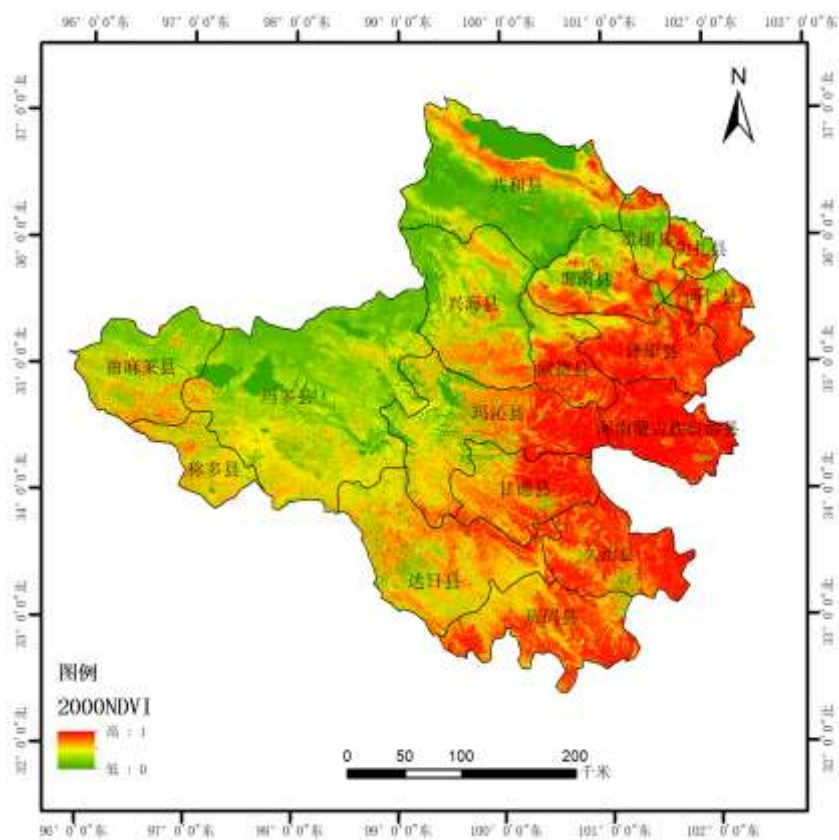


图 4.1 黄河源 2000 年 NDVI 分布图

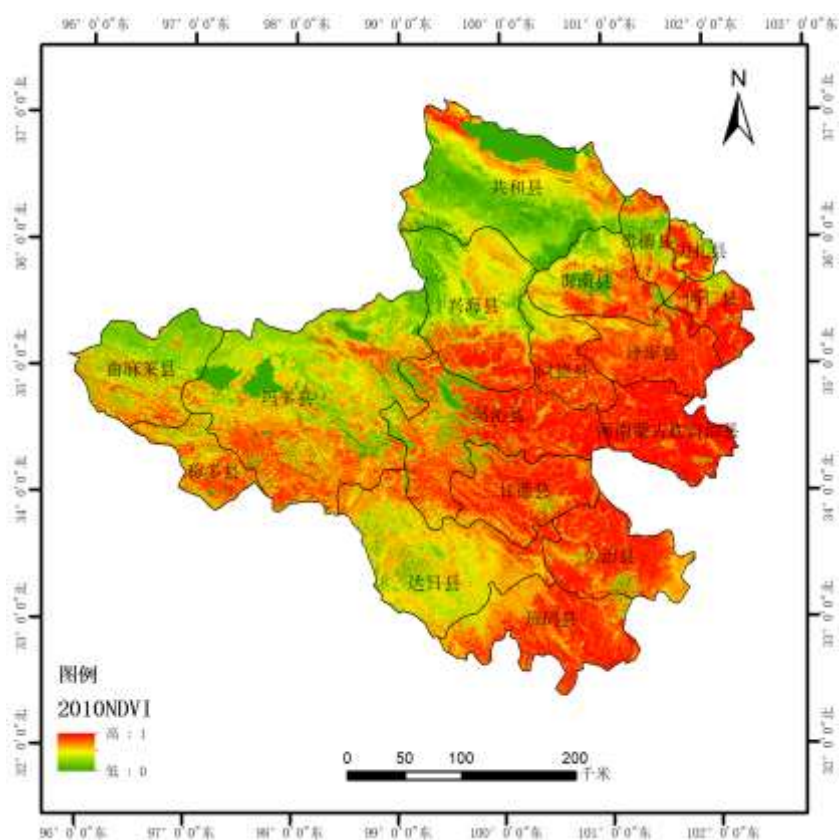


图 4.2 黄河源 2010 年 NDVI 分布图

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/918043121025006042>