

地理因子对北部湾经济区植被覆盖的影响

熊小菊,廖春贵,陈月连,胡宝清,陈依兰

(广西师范学院地理科学与规划学院/北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室/广西地表过程与智能模拟重点实验室,广西南宁 530001)

摘要:以人类活动强烈和生态脆弱的北部湾经济区为研究对象,结合遥感生态数据、社会经济数据,运用地理探测器来定量评价地理因子对植被覆盖变化的影响。研究表明,北部湾经济区植被覆盖从东往西呈高-低-高分布,归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)随纬度的增加呈波动上升趋势;各地级市的植被覆盖波动差异明显,以波动较小为主;植被覆盖改善的面积大于退化的面积,植被逐步得到改善;植被覆盖变化的主要驱动因子按贡献率大小排列依次为降水、土壤类型、植被类型、人均GDP、坡度。

关键词:植被覆盖;地理探测器;定量分析;交互作用;北部湾经济区;归一化植被指数

中图分类号: Q948.2;S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)07-0268-05

随着全球气候变暖、人类活动的加剧,地表植被遭到了不同程度的破坏^[1]。植被是自然生态环境的重要组成部分,不仅给人类提供了丰富的木材产品,在调节大气稳定、水土保持方面也发挥着重要的作用^[2-3]。随着遥感技术的发展,人们可以长时间、大范围监测植被的变化,归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)就是其中一种有效的监测指标,归一化植被指数被广泛应用于植被覆盖变化的监测^[4-5]。学者对植被覆盖做了不少研究,郭梦媚等利用归一化植被指数对江西省植被覆盖变化进行分析,结果表明江西省植被覆盖呈增加趋势^[6];李岩等对西乌珠穆沁旗的植被覆盖特征进行研究,结果表明不同地貌的植被覆盖差异较大,其中低山丘陵的较低^[7];方利等对黑龙江归省一化植被指数与气温、降水的相关性进行研究,结果表明各区域归一化植被指数对气候因子的响应差异较大^[8];王志鹏等对青藏高原草地NDVI与降水的相关性进行分析,结果显示高寒荒漠NDVI受降水影响较大^[9];徐静文等对汉江植被覆盖与地貌因子的关系进行研究,结果表明平原、台地等NDVI呈上升趋势,各地貌类型的植被覆盖变化差异显著^[10]。目前对植被覆盖的研究主要集中于时空变化规律及其与气候、地貌、地质等自然因子的简单相关性分析,缺乏对人文地理因子与植被覆盖关系的定量研究。地理探测器是探测空间分异性的方法,能有效揭示其背后的影响因素,能定量评价地理因子对植被覆盖变化的贡献率以及地理因子之间的交互作用,因此可用于植被覆盖影响因子的探测分析^[11-12]。

收稿日期:2018-02-05

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0502401);国家自然科学基金(编号:21661021、41701605);广西自然科学基金创新团队项目(编号:2016JF15001);广西自然科学基金(编号:2017GXNSFBA198169);广西师范学院大学生创新创业大赛区级项目(编号:201710603260)。

作者简介:熊小菊(1992—),女,广西桂林人,硕士研究生,主要从事国土资源与植被遥感研究。E-mail:1612130738@qq.com。

通信作者:胡宝清,博士,教授,主要从事流域脆弱环境演变与整治研究。E-mail:hbq1230@gxtc.edu.cn。

2008年北部湾经济区成立后,大批工厂入驻,当地的生态环境发生了较大的变化^[13-14]。对北部湾经济区植被覆盖的监测,能有效地反映其生态环境质量的变化^[15]。运用地理探测器模型对北部湾经济区植被覆盖的驱动因子进行研究,有助于揭示影响植被覆盖变化的主要驱动因子,为北部湾经济区生态环境质量保护及开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究根据文献[16-17]的研究成果以及北部湾经济区的实际情况,选择降水、土壤类型、植被类型、坡度、气温、坡向、海拔高程等7个自然地理因素以及地区生产总值(GDP)、人均GDP、人口密度、农村居民人均纯收入、城镇居民人均可支配收入、粮食总产量、居民生活用电量、耕地面积等8个人文地理因素对植被覆盖的影响进行探测分析。其中归一化植被指数(NDVI)数据集来自美国国家航天局,空间分辨率为250 m×250 m;海拔高程数据来自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为90 m×90 m;气温降水数据来自中国地面气候资料日值数据集;地区生产总值、人口数量、农村居民人均纯收入、城镇居民人均可支配收入、粮食总产量、耕地面积等人文因子数据来源于广西壮族自治区统计信息网站(<http://www.gxtj.gov.cn>)。

1.2 一元线性回归法

对植被覆盖变化趋势的研究,能有效地了解研究区哪个地区的植被得到改善,哪个地区的植被退化了,有利于当地生态环境的保护与建设^[18]。众多学者的研究表明,一元线性回归法能有效模拟和预测NDVI的变化,其计算公式如下^[5]:

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:Slope为趋势线的斜率;n为研究时间序列长度;i为年份序号;NDVI_i为第i年的NDVI平均值。根据文献[19]的研究,当Slope≤-0.009时,植被重度退化;当-0.009<Slope≤-0.0045时,植被中度退化;当-0.0045<Slope≤-0.0010

时,植被轻微退化;当 $-0.001\ 0 < Slope \leq 0.001\ 0$ 时,植被基本不变;当 $0.001\ 0 < Slope \leq 0.004\ 5$ 时,植被轻微改善;当 $0.004\ 5 < Slope \leq 0.009\ 0$ 时,植被中度改善;当 $Slope > 0.009\ 0$ 时,植被则明显改善。

1.3 标准差法

对研究区 NDVI 的标准差进行研究,能了解哪些区域的植被覆盖波动大、哪些区域的植被覆盖波动小,有效地监控研究区植被的变化情况,其计算公式如下^[19]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (NDVI_i - \overline{NDVI})^2} \quad (2)$$

式中: S 为 NDVI 的标准差值; $\overline{NDVI}$ 为 2007—2016 年 NDVI 的均值。

1.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异的有效工具,是一种运算速度快、数据要求低、精确度高的空间分析模型,被广泛应用于植被覆盖变化、土地利用、环境污染等方面。地理探测器主要由交互作用探测、因子探测、风险探测和生态探测等 4 个模块组成。地理探测器原理、使用步骤、应用案例、结果分析等详见文献^[11-12]。

本研究从自然和人文 2 个方面,结合北部湾经济区的实际情况,选择 15 个地理因子对植被覆盖的变化进行探测,主要运用地理探测器的交互作用探测和因子探测模块。用因子探测模块分别计算出自然地理因子、人文对植被覆盖变化的相对重要性,交互作用模块主要是探测自然因子、人文因子对植被覆盖的交互影响。首先在 ArcGIS 10.2 软件中将地理因子数据进行分类,利用工具生成 $1\ km \times 1\ km$ 的网格图,根据网格图的中心点提取 NDVI 及其对应的地理因子数据,然后在地理探测器模型中,以 NDVI 为 Y 变量,地理因子数据为 X 变量进行探测。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖随经度、纬度变化

不同经纬度地区的气温、降水以及植被类型各不相同,研究植被覆盖在纬向、经向的变化规律具有重大的意义。由图 1 可知,北部湾经济区不同经度区域的植被覆盖差异明显。在 $106.5^\circ \sim 109.1^\circ E$ 区域的 NDVI 平均值随经度的增加而显著下降;在 $109.2^\circ \sim 110.5^\circ E$ 区域的 NDVI 平均值随经度的增加而波动上升。研究区东、西部 NDVI 平均值较大,中部 NDVI 平均值较小,NDVI 平均值从东往西呈现高一低一高的分布趋势。整体上,研究区 NDVI 值与经度呈负相关关系,与田义超等的研究结果^[19] 基本一致。

分析研究区不同纬度区域的植被覆盖,有利于理清两者之间的复杂关系。由图 2 可知,2007—2016 年研究区 NDVI 平均值随纬度的增加而波动上升。纬度低于 $21.4^\circ N$ 区域的 NDVI 平均值在 0.7 以下,主要是这些区域多为滨海平原,地势平坦,交通便利,人类活动强烈,植被覆盖较低。研究表明,不同纬度区域植被覆盖差异明显,整体上 NDVI 平均值与纬度呈正相关关系,与田义超等的研究结果^[19] 基本一致。

2.2 植被覆盖波动分析

基于像元尺度计算北部湾经济区 NDVI 的标准差。根据文献^[19] 将植被覆盖波动变化划分为波动大、波动较大、波

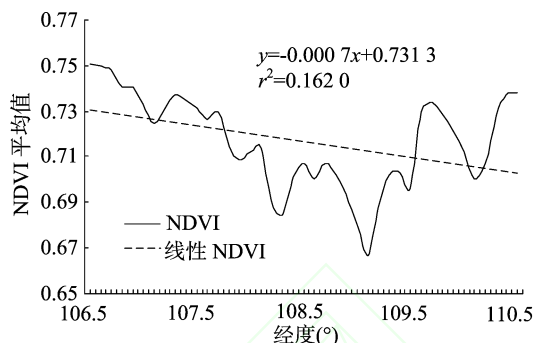


图1 北部湾经济区 NDVI 平均值经向变化

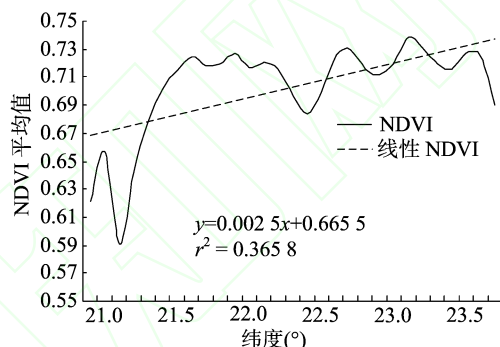


图2 北部湾经济区 NDVI 平均值纬向变化

动小、波动较小、波动一般等 5 个级别。北部湾经济区各区域 NDVI 标准差的空间分布差异比较明显,NDVI 标准差在 0.006~0.106 之间。由图 3 可知,北部湾经济区植被覆盖波动大的面积有 $1\ 617\ km^2$, 占总面积的 2.22%; 植被覆盖波动较大的面积有 $6\ 315\ km^2$, 占总面积的 8.68%; 植被覆盖波动一般的面积为 $21\ 250\ km^2$, 占总面积的 29.22%; 植被覆盖波动较小的面积为 $27\ 402\ km^2$, 占总面积的 37.67%; 植被覆盖波动小的面积为 $16\ 155\ km^2$, 占总面积的 22.21%。由此可知,研究区大部分区域的植被覆盖波动变化幅度不大,以波动较小为主。

对研究区各地级市植被覆盖波动进行分析,由图 3 可知,地级市的植被覆盖波动情况各不相同。植被覆盖波动较小在防城港、钦州、玉林、崇左、南宁占的比重最大,分别占区域面积的 42.45%、38.51%、36.47%、37.13%、37.54%,其中防城港的最高。植被覆盖波动一般在北海、防城港、钦州、玉林、崇左、南宁占的比重较大,分别占区域面积的 36.32%、35.80%、35.68%、30.36%、28.48%、23.00%,其中北海的最高。植被覆盖波动大、波动较大在各地级市占的比例不大。植被覆盖波动小在玉林、崇左、南宁占的比重较大,而在北海、防城港占的比重较小,空间分布差异明显。

2.3 植被覆盖变化趋势

由表 1 可知,北部湾经济区植被覆盖轻微改善的面积最多,为 $18\ 759.5\ km^2$; 重度退化的面积最少,仅有 $3\ 797\ km^2$ 。对研究区植被覆盖退化情况进行分析,植被覆盖退化的面积有 $22\ 731.1\ km^2$, 占研究区面积的 31.25%, 其中重度退化、中度退化、轻微退化的面积分别占总退化面积的 16.7%、29.6%、53.7%。植被覆盖轻度退化面积占的比重较大,主要分布在西南部 and 东南部,如龙州、凭祥等; 植被覆盖中度退化面积占的比重较小,零星分布在研究区的西北部,如江州、扶

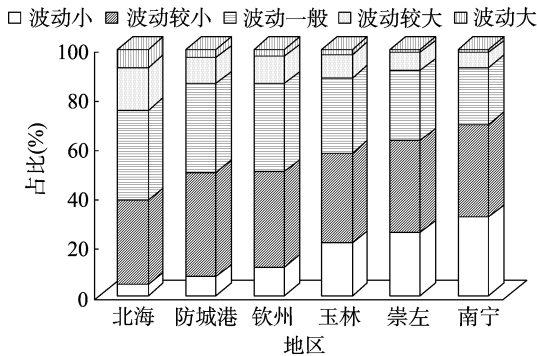


图3 北部湾经济区植被覆盖波动空间分布

表 1 北部湾经济区 NDVI 变化趋势

程度	面积 (km ²)	比例 (%)
重度退化	3 797.0	5.22
中度退化	6 735.7	9.26
轻微退化	12 198.4	16.77
基本不变	10 176.2	13.99
轻微改善	18 759.5	25.79
中度改善	14 882.5	20.46
明显改善	6 190.1	8.51

缓等;植被覆盖重度退化面积占的比重最小,呈斑块状分布在研究区的南部沿海地区,如铁山港、东兴等。研究区植被覆盖退化呈东、西部较严峻,中部地区较轻的趋势。

对研究区植被覆盖改善情况进行分析,植被覆盖得到改善的面积有 39 832.1 km²,占研究区面积的 54.76%,其中轻微改善、中度改善、明显改善的面积分别占总改善面积的 47.1%、37.4%、15.5%。植被覆盖轻微改善面积占的比重最大,大面积分布在北部湾经济区的西北和中部,如天等、上思;植被覆盖中度改善面积占的比重较大,明显改善面积占的比重较小,植被覆盖中度改善和明显改善的区域具有较高的重叠性,主要分布在研究区的中部,如邕宁、良庆等。研究区中部植被覆盖改善比较显著。对比植被覆盖改善和退化情况可知,北部湾经济区植被覆盖改善的面积大于退化的面积,2007—2016 年植被逐步得到改善。

在 ArcGIS 10.2 软件中利用表面分析工具,从海拔高程数据集中提取研究区的坡度,根据坡度值的大小划分为 4 类。由图 4 可知,不同坡度区域的植被覆盖变化趋势差异明显,各坡度植被覆盖改善的比例均大于退化的,各坡度植被覆盖得到改善的比例均高于 49%,其中坡度在 >15°~25°区域的最大,为 59.6%。植被覆盖重度退化、明显改善、中度退化、轻微退化在坡度 ≤2°中占的比例最大,分别占 8.41%、9.12%、12.06%、17.56%;植被覆盖轻微改善在 >15°~25°区域中占的比例最大,为 31.71%。研究表明,不同坡度的植被覆盖变化趋势各不相同。

2.4 植被覆盖变化地理因子的探究

2.4.1 地理因子的贡献率 植被分布受气温、降水、社会经济等多种因素的影响^[20-22],对影响植被覆盖的自然地理因子、人文地理因子进行探测,有助于揭示影响植被覆盖变化的主要因子。在 ArcGIS 10.2 中利用工具提取相应点的 NDVI、自然地理因子数据以及人文地理因子数据,利用地理探测器

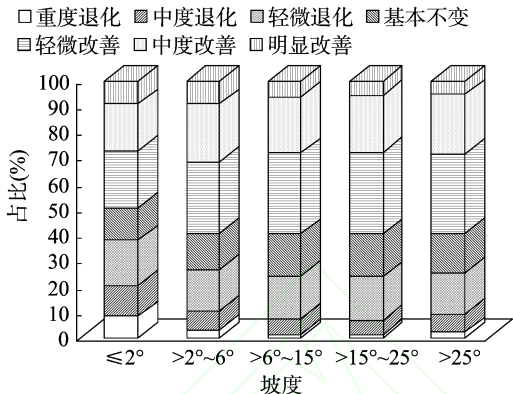


图4 不同坡度区域的 NDVI 变化趋势

进行运算,得到 NDVI 与地理因子之间的贡献率,确定地理因子对植被覆盖变化的相对重要性。研究表明,自然地理因子影响 NDVI 变化的贡献率从大到小排序为降水(28.02%)、土壤类型(18.75%)、植被类型(15.24%)、坡度(10.79%)、气温(1.86%)、坡向(0.55%)、海拔高程(0.19%)。从自然地理因子对 NDVI 的贡献率来看,降水的贡献率最大,且降水、植被类型、土壤类型和坡度的影响力较高,都在 10% 以上,是影响研究区植被覆盖变化的主要自然因子。而气温、坡向、海拔高程对植被覆盖变化的影响较低,不足 2%。因此,降水、植被类型、土壤类型和坡度等 4 个因子可作为探测研究区植被覆盖变化的主要自然地理因子。

分析人口密度、地区生产总值、耕地面积等人文因子对植被覆盖变化的相对重要性。研究表明,人文因子对 NDVI 变化的贡献率从大到小排序为人均 GDP(12.49%)、GDP(8.29%)、人口密度(7.86%)、农村居民人均纯收入(5.02%)、城镇居民人均可支配收入(4.49%)、粮食总产量(3.04%)、居民生活用电量(2.66%)、耕地面积(2.39%)。从人文因子对 NDVI 的影响程度来看,人均 GDP 的贡献率最大,影响力在 10% 以上,是影响植被覆盖变化的主要人文因素;其次是 GDP、人口密度、农村居民人均纯收入等影响力都在 5% 以上,而城镇居民人均可支配收入、粮食总产量、居民生活用电量、耕地面积对植被覆盖变化的贡献率较小。

植被覆盖变化是自然和人文因子综合作用的结果,运用地理探测器求出 2007—2016 年研究区植被覆盖变化地理因子的贡献率,结果表明,降水、土壤类型、植被类型、人均 GDP、坡度等 5 个因子对植被覆盖的变化具有较大的贡献率,而 GDP、人口密度、农村居民人均纯收入、城镇居民人均可支配收入、粮食总产量、居民生活用电量、耕地面积、气温、坡向、海拔高程等 10 个地理因子对植被覆盖变化的贡献率较小。

2.4.2 自然因子对植被覆盖的交互影响 在地理探测器中,选择交互作用模块对自然因子进行交互探测,识别不用自然影响因子之间的交互关系。由表 2 可知,2007—2016 年各自然影响因子对植被覆盖变化的交互作用大部分具有较强的双协同作用,其中解释力较大的自然因子从大到小依次为植被类型∩降水(32.20%)、坡度∩降水(31.61%)、降水∩土壤类型(30.29%)、气温∩降水(29.78%)、海拔高程∩降水(28.37%)、降水∩坡向(28.22%)、植被类型∩土壤类型(25.28%)、坡度∩土壤类型(23.43%)、植被类型∩坡度(22.8%)。海拔高程与气温、植被类型、坡度、降水、坡向的

表 2 2007—2016 年北部湾经济植被覆盖变化自然因子的交互作用

影响因子 $C_1 \cap C_2$	$E = PD(C_1 \cap C_2)$	$PD(C_1)$	$PD(C_2)$	$F = PD(C_1) + PD(C_2)$	E 与 F 大小比较
植被类型 $\cap$ 降水	0.322 0	0.152 4	0.280 2	0.432 6	$E < F$
坡度 $\cap$ 降水	0.316 1	0.107 9	0.280 2	0.388 1	$E < F$
降水 $\cap$ 土壤类型	0.302 9	0.280 2	0.187 5	0.467 7	$E < F$
气温 $\cap$ 降水	0.297 8	0.018 6	0.280 2	0.298 8	$E < F$
海拔高程 $\cap$ 降水	0.283 7	0.001 9	0.280 2	0.282 1	$E > F$
降水 $\cap$ 坡向	0.282 2	0.280 2	0.005 5	0.285 7	$E < F$
植被类型 $\cap$ 土壤类型	0.252 8	0.152 4	0.187 5	0.339 9	$E < F$
坡度 $\cap$ 土壤类型	0.234 3	0.107 9	0.187 5	0.295 4	$E < F$
植被类型 $\cap$ 坡度	0.228 0	0.152 4	0.107 9	0.260 3	$E < F$
气温 $\cap$ 土壤类型	0.198 5	0.018 6	0.187 5	0.206 1	$E < F$
土壤类型 $\cap$ 坡向	0.190 2	0.187 5	0.005 5	0.193 0	$E < F$
海拔高程 $\cap$ 土壤类型	0.188 2	0.001 9	0.187 5	0.189 4	$E < F$
气温 $\cap$ 植被类型	0.169 1	0.018 6	0.152 4	0.171 0	$E < F$
植被类型 $\cap$ 坡向	0.156 3	0.152 4	0.005 5	0.157 9	$E < F$
海拔高程 $\cap$ 植被类型	0.155 2	0.001 9	0.152 4	0.154 3	$E > F$
气温 $\cap$ 坡度	0.133 8	0.018 6	0.107 9	0.126 5	$E > F$
坡度 $\cap$ 坡向	0.113 7	0.107 9	0.005 5	0.113 4	$E > F$
海拔高程 $\cap$ 坡度	0.110 4	0.001 9	0.107 9	0.109 8	$E > F$
海拔高程 $\cap$ 气温	0.052 6	0.001 9	0.018 6	0.020 5	$E > F$
气温 $\cap$ 坡向	0.024 5	0.018 6	0.005 5	0.024 1	$E > F$
海拔高程 $\cap$ 坡向	0.008 0	0.001 9	0.005 5	0.007 4	$E > F$

注: C 为影响因子; PD 为影响因子对植被覆盖的解释力, 即贡献率; $E > F$ 为非线性协同作用, $E < F$ 为双协同作用。下表同。

交互为非线性协同作用, 说明海拔高程增强了气温、植被类型、坡度、降水、坡向对植被覆盖的影响, 同时气温与坡度、坡向也为非线性协同作用, 说明气温增强了坡度和坡向对植被覆盖的影响。因此, 海拔高程和气温可作为辅助自然因子应用于植被覆盖监测, 研究结果与庞静的结论^[17]基本一致。

2.4.3 人文因子对植被覆盖的交互影响 对影响研究区植被覆盖的人文因子进行交互作用探测。由表 3 可知, 人文影响因子对植被覆盖变化的交互作用呈现双协同作用、非线性协同作用并存, 其中解释力较大的人文因子从大到小依次为居民生活用电量 $\cap$ 人均 GDP (14.83%) 和人均 GDP $\cap$ 城镇居民人均可支配收入 (14.83%)、人均 GDP $\cap$ 粮食总产量 (14.49%)、耕地面积 $\cap$ 人均 GDP (14.33%)、人均 GDP $\cap$ 农村居民人均纯收入 (14.25%)、GDP $\cap$ 人均 GDP (13.11%)、人口密度 $\cap$ 人均 GDP (13.10%)、人口密度 $\cap$ 粮食总产量 (13.04%)。对植被覆盖影响力较小的人口密度与耕地面积、粮食总产量的交互探测表现为非线性协同作用, 说明人口密度增强了耕地面积、粮食总产量对植被覆盖的影响。研究表明, 人文因子之间的相互叠加增强了单一因子对植被覆盖的影响。

2.4.4 自然与人文因子对植被覆盖的交互影响 对自然因子与人文因子之间的交互作用进行探测, 有利于揭示植被覆盖变化的驱动机制。选择贡献率大于 10% 的主要影响因子, 用地理探测器的交互探测模块, 探测主要地理因子之间的交互作用。由表 4 可知, 地理因子影响 NDVI 变化的贡献率从大到小排序为降水 (28.02%)、土壤类型 (18.75%)、植被类型 (15.24%)、人均 GDP (12.49%)、坡度 (10.79%)。地理因子对植被覆盖的交互探测中, 解释力较大的影响因子从大到小依次为降水 $\cap$ 人均 GDP (34.33%)、降水 $\cap$ 植被类型 (32.2%)、降水 $\cap$ 坡度 (31.61%)、土壤类型 $\cap$ 降水 (30.29%), 各影响因子之间的交互作用均在 30% 以上。自

然因子与人文因子之间的交互均为双协同作用, 说明多因子的叠加比单一因子对植被覆盖的影响更大, 植被覆盖分布及变化受到自然因子和人文因子的共同影响。

3 结论与讨论

北部湾经济区不同经度、纬度植被覆盖差异明显, 东、西部 NDVI 较大, 中部 NDVI 较小, NDVI 从东往西呈高—低—高的分布。整体上, 研究区 NDVI 随经度的增大而减小, 随纬度的增大而增大。NDVI 标准差在 0.006~0.106 之间, 大部分区域的植被覆盖波动变化幅度不大, 以波动较小为主。植被覆盖得到改善的面积大于退化的面积, 植被覆盖逐步改善。

北部湾经济区植被覆盖变化的主要地理影响因子有降水、土壤类型、植被类型、人均 GDP、坡度。自然因子对植被覆盖变化的交互作用大部分具有较强的双协同作用, 海拔高程与气温、植被类型、坡度、降水、坡向的交互作用为非线性协同作用, 海拔高程增强了气温、植被类型、坡度、降水、坡向对植被覆盖的影响。自然因子与人文因子之间的交互均为双协同作用, 多因子的叠加比单一因子对植被覆盖的影响更大, 植被覆盖分布及变化受到自然因子和人文因子的共同影响。

致谢: 对广西师范学院汪洋、刘警鉴在数据处理方面给予的帮助, 深表谢意!

参考文献:

[1] Cai B F, Yu R. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(6): 1170-1186.
[2] 石悦樾, 银正彤, 郑文锋. 基于 GLDAS 和 MODIS 的乌江流域植被与地表水变化关系研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 192-198.

表 3 2007—2016 年北部湾经济植被覆盖变化人文因子的交互作用

影响因子 $C_1 \cap C_2$	$E = PD(C_1 \cap C_2)$	$PD(C_1)$	$PD(C_2)$	$F = PD(C_1) + PD(C_2)$	E 与 F 大小比较
居民生活用电量 $\cap$ 人均 GDP	0.148 3	0.026 6	0.124 9	0.151 5	$E < F$
人均 GDP $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.148 3	0.124 9	0.045 0	0.169 9	$E < F$
人均 GDP $\cap$ 粮食总产量	0.144 9	0.124 9	0.030 4	0.155 3	$E < F$
耕地面积 $\cap$ 人均 GDP	0.143 3	0.023 9	0.124 9	0.148 8	$E < F$
人均 GDP $\cap$ 农村居民人均纯收入	0.142 5	0.124 9	0.050 2	0.175 1	$E < F$
GDP $\cap$ 人均 GDP	0.131 1	0.083 0	0.124 9	0.207 9	$E < F$
人口密度 $\cap$ 人均 GDP	0.131 0	0.078 6	0.124 9	0.203 5	$E < F$
人口密度 $\cap$ 粮食总产量	0.130 4	0.078 6	0.030 4	0.109 0	$E > F$
耕地面积 $\cap$ 粮食总产量	0.128 5	0.023 9	0.030 4	0.054 3	$E > F$
农村居民人均纯收入 $\cap$ 粮食总产量	0.123 4	0.050 2	0.030 4	0.080 6	$E > F$
居民生活用电量 $\cap$ 耕地面积	0.122 8	0.026 6	0.023 9	0.050 5	$E > F$
GDP $\cap$ 农村居民人均纯收入	0.120 8	0.083 0	0.050 2	0.133 2	$E < F$
居民生活用电量 $\cap$ 粮食总产量	0.119 3	0.026 6	0.030 4	0.057 0	$E > F$
GDP $\cap$ 居民生活用电量	0.118 4	0.083 0	0.026 6	0.109 6	$E > F$
耕地面积 $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.117 4	0.023 9	0.045 0	0.068 9	$E > F$
粮食总产量 $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.117 1	0.030 4	0.045 0	0.075 4	$E > F$
GDP $\cap$ 粮食总产量	0.115 7	0.083 0	0.030 4	0.113 4	$E > F$
人口密度 $\cap$ 耕地面积	0.108 9	0.078 6	0.023 9	0.102 5	$E > F$
居民生活用电量 $\cap$ 农村居民人均纯收入	0.108 6	0.026 6	0.050 2	0.076 8	$E > F$
人口密度 $\cap$ 农村居民人均纯收入	0.108 5	0.078 6	0.050 2	0.128 8	$E < F$
人口密度 $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.108 4	0.078 6	0.045 0	0.123 6	$E < F$
农村居民人均纯收入 $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.106 2	0.050 2	0.045 0	0.095 2	$E > F$
GDP $\cap$ 耕地面积	0.104 3	0.083 0	0.023 9	0.106 9	$E < F$
人口密度 $\cap$ GDP	0.102 4	0.078 6	0.083 0	0.161 6	$E < F$
耕地面积 $\cap$ 农村居民人均纯收入	0.101 2	0.023 9	0.050 2	0.074 1	$E > F$
GDP $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.098 2	0.083 0	0.045 0	0.128 0	$E < F$
人口密度 $\cap$ 居民生活用电量	0.095 7	0.078 6	0.026 6	0.105 2	$E < F$
居民生活用电量 $\cap$ 城镇居民人均可支配收入	0.079 4	0.026 6	0.045 0	0.071 6	$E > F$

表 4 2007—2016 年北部湾经济植被覆盖变化地理因子的交互作用

影响因子 $C_1 \cap C_2$	$E = PD(C_1 \cap C_2)$	$PD(C_1)$	$PD(C_2)$	$A = PD(C_1) + PD(C_2)$	E 与 F 大小比较
降水 $\cap$ 人均 GDP	0.343 3	0.280 2	0.124 9	0.405 1	$E < F$
降水 $\cap$ 植被类型	0.322 0	0.280 2	0.152 4	0.432 6	$E < F$
降水 $\cap$ 坡度	0.316 1	0.280 2	0.107 9	0.388 1	$E < F$
土壤类型 $\cap$ 降水	0.302 9	0.187 5	0.280 2	0.467 7	$E < F$
土壤类型 $\cap$ 人均 GDP	0.268 3	0.187 5	0.124 9	0.312 4	$E < F$
植被类型 $\cap$ 人均 GDP	0.260 5	0.152 4	0.124 9	0.277 3	$E < F$
土壤类型 $\cap$ 植被类型	0.252 8	0.187 5	0.152 4	0.339 9	$E < F$
土壤类型 $\cap$ 坡度	0.234 3	0.187 5	0.107 9	0.295 4	$E < F$
坡度 $\cap$ 植被类型	0.228 0	0.107 9	0.152 4	0.260 3	$E < F$
坡度 $\cap$ 人均 GDP	0.204 1	0.107 9	0.124 9	0.232 8	$E < F$

[3] 廖春贵,熊小菊,胡宝清,等. 北部湾经济区植被覆盖变化特征及驱动因素[J]. 科学技术与工程,2018,18(19):20-25.

[4] 王志国,尚士友,乔秀芸,等. 内蒙古典型草原植被盖度与植物生长高度的相关性研究[J]. 江苏农业科学,2014,42(11):361-363.

[5] 廖春贵,胡宝清,熊小菊,等. 广西植被时空变化及其对气候响应[J]. 森林与环境学报,2018,38(2):178-184.

[6] 郭梦媚,郭胜利,周佳雯,等. 江西省植被 NDVI 变化及其对气候变化的响应[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):421-426.

[7] 李岩,尚士友,王晓娟,等. 西乌珠穆沁典型草原植被盖度空间异质性研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):283-288.

[8] 方利,王文杰,蒋卫国,等. 2000—2014 年黑龙江流域(中国)植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学,2017,37(11):1745-1754.

[9] 王志鹏,张宪洲,何永涛,等. 2000—2015 年青藏高原草地归一化植被指数对降水变化的响应[J]. 应用生态学报,2018,29(1):75-83.

[10] 徐静文,肖飞,廖炜,等. 基于 MODIS NDVI 汉江中游植被时空变化及其地貌分异分析[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(11):1895-1901.

[11] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理科学,2017,72(1):116-134.

[12] 刘吉平,马长迪,刘雁,等. 基于地理探测器的沼泽湿地变化驱动因子定量分析——以小三江平原为例[J]. 东北师大学报(自然科学版),2017,49(2):127-135.

[13] 熊小菊,廖春贵,胡宝清. 广西海岸带旅游资源同质化问题研究[J]. 农村经济与科技,2018,29(9):103-105.

周晓伦,万建新,王卫卫,等.一株提高植物幼苗耐受 Cr^{6+} 细菌(*Exiguobacterium* sp. S2)的分离与鉴定[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):273-277. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.065

一株提高植物幼苗耐受 Cr^{6+} 细菌(*Exiguobacterium* sp. S2)的分离与鉴定

周晓伦¹,万建新¹,王卫卫²,张伟¹,姚彦红¹,高芸¹

(1.甘肃医学院病原生物学教研室,甘肃平凉 744000; 2.西北大学西部资源生物与现代生物技术教育部重点实验室,陕西西安 710069)

摘要:植物促生菌因其具有对植物生长促进及增强抗逆性等优点,在植物-微生物联合修复重金属污染土壤中具有有良好的应用潜力,能为环境生物修复以及工农业生产提供优良菌种资源,实现其更大范围的应用。以甘肃省平凉市污染土壤中分离得到的 Cr^{6+} 耐受菌株为目的菌,测定菌株的促植物生长特性(产 IAA、溶磷、ACC 脱氢酶活性),采用改良的 Belimov 方法筛选出 1 株促生特性较好的菌株,进行生理生化及 16S rRNA 基因序列分析鉴定。初步分离得到 32 株 Cr^{6+} 耐受菌株,根据改良的 Belimov 方法筛选出 1 株 S2 菌株,通过生理生化及 16S rRNA 鉴定 S2 菌株为 *Exiguobacterium* sp.,GenBank 登录号为 MH180821。玉米幼苗生长试验表明,与不同 Cr^{6+} 浓度处理组相比,接种了 S2 菌株的玉米幼苗根长、茎长、叶面积都有显著提高,平均根长分别增加 95.74%、41.34%、194.12%,平均茎长分别增加 32.03%、-30.13%、28.96%,平均叶面积分别增加 73.94%、35.17%、26.92%,平均鲜质量分别增加 33.33%、33.62%、-20.00%,其显著提高了玉米幼苗对 Cr^{6+} 的耐受性。该研究表明,*Exiguobacterium* sp. S2 在污染土壤中能够更好地定殖并保护促植物生长能力的发挥,为重金属污染土壤的植物-微生物联合原位修复提供了良好的微生物资源。

关键词:玉米幼苗; Cr^{6+} 耐受菌株;ACC 脱氢酶;吡啶乙酸;微小杆菌

中图分类号: X53;S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)07-0273-05

在过去几十年的工业领域中,大量的使用重金属[铬(Cr)、镍、铜、锌、铅、镉等]导致土壤和地下水污染,对人类健康和生态环境造成重大的威胁。在不同的重金属中,铬是主要的污染物之一,由皮革制革、电镀、采矿、纺织、金属加工、化肥、染料和颜料制造等各种工业应用产生^[1]。Cr 化合物对植物的毒性很大,不利于植物的新陈代谢。虽然许多植物不受低浓度 Cr ($3.8 \times 10^{-4} \mu\text{mol/L}$) 的影响,但当 Cr 浓度为 $100 \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{kg})$ 时,对高等植物有毒害^[2]。外部环境存在的 Cr 改变了植物生长发育的格局。已有研究表明根生长的减少是由于树木和植物中的重金属^[3]。

文献调查表明,几乎没有人报道植物中铬毒性的改良方法,主要原因在于大多数研究集中于通过树木和植物促进 Cr

的积累,达到植物修复的作用。Khan 报道合欢树、阿拉伯相思树和印度黄檀这些树种的菌根保护它们免受重金属的毒害和制革厂废水铬的污染^[4]。Karagiannidis 等研究泡囊丛枝菌根真菌(漏斗泡球囊霉)对硬质小麦生长和营养吸收的影响,证实泡囊丛枝菌根真菌(VAFM)能够提高小麦的生物量和减少 Cr 在植物中的含量^[5]。Davies 等发现 VAFM 能够增强向日葵耐受 Cr 的能力,VAFM 对 Cr 处理植物的组织矿物浓度、生长和气体交换都有积极的作用^[6-7]。正如 Burd 等陈述的,在重金属污染的土壤中重金属含量已经超过了植物的耐受范围,它可能会用根际微生物处理植物以此来增加植物的生物量,稳定和修复被污染环境中的植物^[8]。

植物对重金属的耐受与其产生的一种多肽类物质有关,这种物质能够螯合重金属,从而减少重金属对植物根系酶的伤害^[9]。植物根的活动可能增加金属、非金属的溶解性,通过酸化、氧化还原反应、分泌金属螯合物或者有机配体与阴离子竞争结合位点^[10]。微生物通过产生有机配体,分解土壤中的有机物质或者分泌一些代谢物能够改变金属、非金属之间

收稿日期:2019-01-21

基金项目:甘肃省高等学校科学研究项目(编号:2017A-146)。

作者简介:周晓伦(1987—),男,甘肃靖远人,硕士,讲师,主要从事土壤微生物的研究。E-mail:610253095@qq.com。

[14]熊小菊,廖春贵,胡宝清.广西防城港市旅游资源开发研究[J]. 现代园艺,2018(6):20-21.

[15]廖春贵,熊小菊,陈依兰,等.北部湾经济区社会——生态系统耦合关联分析[J]. 大众科技,2018,20(1):13-15,21.

[16]李俊刚,闫庆武,熊集兵,等.贵州省煤矿区植被指数变化及其影响因子分析[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(3):374-378.

[17]庞静.基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响[D].太原:山西大学,2016.

[18]廖春贵,熊小菊,胡宝清,等.广西不同岩性植被覆盖变化及对

人类活动的响应[J]. 生态经济,2018,34(6):168-173.

[19]田义超,梁铭忠.基于 SPOT-VEGETATION 的北部湾经济区植被变化特征[J]. 农业现代化研究,2014,35(4):465-471.

[20]熊小菊,廖春贵,胡宝清.基于遥感数据的广西植被变化特征分析[J]. 科学技术与工程,2018,18(11):123-128.

[21]逯颖,王涛,田阳.秦岭山地森林植被变化及对气候响应的地形影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):214-218.

[22]李晗,周艳莲,居为民,等.植被指数对藏北高寒草甸干旱的敏感性分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):219-224.