

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.059



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 考虑多解释变量共线性的混凝土桥建设期 碳排放测算方法

王元庆, 田蓉, 李士明, 刘聂场子

(长安大学运输工程学院; 道路交通减碳教育部工程研究中心, 西安 710064)

**摘要:** 作为公路建设的重要结构物之一, 混凝土桥建设期产生的碳排放较高, 因而亟须构建精度较高的碳排放测算模型, 以助推其建设过程低碳化。将公路混凝土桥建设期碳排放来源划分为材料生产、材料运输、场外加工、现场施工 4 个部分, 使用碳排放因子法计算某新建高速公路 31 座混凝土桥建设期的碳排放。通过碳排放特征及相关性分析发现, 解释混凝土桥建设期碳排放的关键要素为桥梁长度、材料总重量、机械工作时间, Spearman 相关系数分别为 0.96、0.88、0.82, 且 3 个要素之间存在共线性。将 3 个要素作为自变量, 构建岭回归、Lasso 回归及弹性网络回归模型以消除共线性的影响, 发现 Lasso 回归模型碳排放测算精度最高,  $R^2$  为 0.976 2, 将其作为混凝土桥建设期碳排放的测算模型。该模型可基于桥梁长度和材料总重量测算混凝土桥不同设计方案和建设方案的碳排放, 为混凝土桥低碳方案设计及建设期减碳要素优化提供方法参考。

**关键词:** 混凝土桥; 碳排放; 建设期; Lasso 回归; 岭回归; 弹性网络回归

中图分类号: U448.33 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)06-0214-10

## Method for estimating carbon emissions during concrete bridge construction considering multivariate collinearity

WANG Yuanqing, TIAN Rong, LI Shiming, LIU Nieyangzi

(School of Transportation Engineering; Engineering Research Center of Road Transportation Decarbonization, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

**Abstract:** Concrete bridges, as critical components of highway construction, generate substantial carbon emissions during their construction phase, necessitating the development of a relatively precise carbon emission estimation model to promote low-carbon construction practices. The present study categorizes the sources of carbon emissions during the construction of highway concrete bridges into material production, transportation, off-site processing, and on-site construction. The carbon emission factor method is employed to calculate the carbon emissions during the construction period of 31 concrete bridges on a newly built expressway. An analysis

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51878062); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-527)。

作者简介: 王元庆(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事低碳交通、智能交通研究, E-mail: wyqing@chd.edu.cn。

刘聂场子(通信作者), 女, 博士生, E-mail: liunieyangzi@chd.edu.cn。

Received: 2024-03-20

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51878062); Shaanxi Provincial Natural Science Basic Research Program (No. 2022JQ-527).

**Author brief:** WANG Yuanqing(1968-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: low-carbon transportation, intelligent transportation, E-mail: wyqing@chd.edu.cn.

LIU Nieyangzi (corresponding author), PhD candidate, E-mail: liunieyangzi@chd.edu.cn.

of carbon emission characteristics and their correlations reveal that factors such as bridge length, total material weight, and machinery working hours significantly influence emissions during bridge construction. The Spearman correlation coefficients for these factors are 0.96, 0.88 and 0.82, respectively, with collinearity observed among them. Employing these variables, ridge regression, Lasso regression, and elastic net regression models were developed to mitigate collinearity. The Lasso regression model demonstrates the highest accuracy in estimating carbon emissions, with an  $R^2$  of 0.976 2, thus making it the preferred model for estimating emissions during bridge construction. This model can calculate the carbon emissions for a variety of design and construction plans of concrete bridges based on bridge length and total material weight, serving as a methodological reference for the development of low-carbon designs and the optimization of carbon reduction strategies during the construction process.

**Keywords:** concrete bridge; carbon emissions; construction period; Lasso regression; ridge regression; elastic network regression

近年来,随着高速公路新改建里程持续增加,其建设产生的碳排放越来越受到重视。桥梁建设中消耗大量钢材、水泥等,使得碳排放远高于高速公路路基、路面等结构物,业界已对通过低碳方案设计、绿色建筑过程、减碳技术/工艺应用分析调控桥梁建设过程碳排放达成共识,其中碳排放的测算是准确、高效实现上述目标时不可或缺的一环,是实现绿色公路建设目标的重要基础性工作。

目前对桥梁碳排放已有一定的研究基础,Collings<sup>[1]</sup>将碳排放等生态环境因素引入到桥梁领域中;刘沐宇等<sup>[2]</sup>从固定燃烧源、流动燃烧源等方面,对武汉某一桥梁生命周期的碳排放进行计算。熊治华等<sup>[3]</sup>、马佳星等<sup>[4]</sup>、Wang等<sup>[5]</sup>、Ma等<sup>[6]</sup>对桥梁建材准备阶段、施工阶段、运营维护阶段以及报废拆除阶段全生命周期的碳排放进行计算,发现桥梁碳排放最高的均为建材准备阶段;Wang等<sup>[7]</sup>对桥梁建设期间产生碳排放的边界及范围进行界定,将建设期划分为材料生产、材料运输和机械施工3个阶段,应用碳排放因子法构建相应的模型,并对某种类型的桥梁进行实例验证。除直接研究具体桥梁碳排放外,也有部分学者<sup>[8-9]</sup>在研究某条高速公路的碳排放情况时对桥梁分项工程的碳排放进行计算及特征分析。既有交通领域解释碳排放要素的研究主要针对整条路<sup>[10]</sup>或隧道<sup>[11]</sup>,研究过程中发现,共线性即模型自变量要素之间存在较强的相关性,导致模型拟合标准误差增大,故多数学者<sup>[12]</sup>在模型构建前预先对碳排放解释要素进行共线性检验。为保证模型的稳定性和鲁棒性,一般采用偏最小二乘法<sup>[13-14]</sup>、收缩法<sup>[15]</sup>等消除要素间共线性带来的影响,常用的收缩法有岭回归<sup>[16]</sup>、Lasso回归<sup>[17]</sup>等。

已有桥梁碳排放数据的研究中,常见的有敏感性分析、碳排放流分析等方法,敏感性分析主要用于考察某单一要素(如碳排放因子)数值改变时引

起碳排放的变化程度;碳排放流分析<sup>[18]</sup>则是对不同桥梁的碳排放数据进行归一化处理,以年碳排放的形式反映其流出,以实现不同桥梁碳排放的对比分析。上述分析方法重点关注引起桥梁碳排放变化的关键要素或不同桥梁的碳排放水平,对解释碳排放的关键要素及要素之间是否存在共线性尚不清楚。为此,笔者利用碳排放因子法,对高速公路使用较多的混凝土桥建设期碳排放进行计算,分析不同碳排放解释要素的影响程度及共线性问题,并搭建岭回归、Lasso回归、弹性网络回归模型,将3个模型中精度最高的模型作为混凝土桥建设期的碳排放测算模型。

## 1 研究方法

### 1.1 碳排放计算模型

#### 1.1.1 边界及范围

碳排放包含二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )等温室气体的排放,本文仅考虑 $\text{CO}_2$ 的排放(以下简称为“碳排放”)。混凝土桥建设期碳排放的计算边界应包含形成其实体、功能的一系列中间产品和单元过程组成的集合。结合混凝土桥的施工工艺及流程,其建设过程包括桩基、承台地系梁、墩柱、盖梁施工等环节,桥建设期碳排放的边界及范围如图1所示。

混凝土建设期碳排放主要来自建筑材料、运输车辆、施工机械3个部分,考虑到施工机械种类、施工场地等的不同,将与运输车辆/施工机械有关的碳排放划分为材料运输、场外加工以及现场施工3类碳排放。在混凝土桥建设过程中,除作业区外,还有办公区和生活区所造成的碳排放,由于此部分碳排放较少且对研究目标影响较小,故不纳入计算范围。

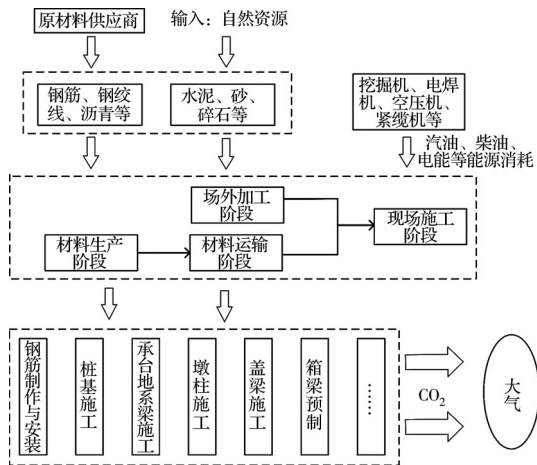


图 1 碳排放边界及范围

Fig. 1 Carbon emission boundary and scope

### 1.1.2 计算模型

碳排放的计算采用碳排放因子法,最初由联合国政府间气候变化专门委员会提出,其核心思想是将材料、机械消耗量等数据乘以相应的碳排放因子来作为某一项目产生的碳排放。为确保碳排放计算过程中不遗漏每一子项,结合公路工程建设中“分单位-分部-分项”工程的划分方式,将混凝土桥划分为上部构造(包括箱梁、桥面、护栏等)、桥墩、桥台等几个主要部位,各部位的分项工程包括土石方工程、混凝土工程等。混凝土桥建设期碳排放即为不同阶段各分部分项工程碳排放的总和,计算公式见式(1)。

$$C_{\text{total}} = C_p + C_q + C_s + C_r = \sum_{i=a,b,c,d} (C_{pi} + C_{qi} + C_{si} + C_{ri}) \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{total}}$  为混凝土桥建设期总碳排放;  $C_p$  为材料生产阶段碳排放;  $C_q$  为材料运输阶段碳排放;  $C_s$  为场外加工阶段碳排放;  $C_r$  为现场施工阶段碳排放;  $i$  为分部工程序号;  $a$  为上部构造;  $b$  为桥墩;  $c$  为桥台;  $d$  为其他部位。

#### 1) 材料生产阶段

材料生产阶段追溯到上游生产过程,考虑原材料生产、提取加工到运输离开生产厂等活动的整个材料物化过程的碳排放,其计算公式见式(2)。

$$C_{pi} = \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{m=1}^{n_2} Q_{pijm} \times f_{pijm} \quad (2)$$

式中:  $Q_{pijm}$  为材料生产阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $m$  种材料的消耗量;  $f_{pijm}$  为材料生产阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $m$  种材料的碳排放因子;  $j$  为分项工程,  $j=1, 2, \dots, n_1$ ;  $m$  为材料种类,  $m=1, 2, \dots, n_2$ 。

#### 2) 材料运输阶段

材料运输阶段碳排放来源于外购材料从生产厂家运送至施工现场或拌和站(楼)产生的碳排放,

其计算公式见式(3)。

$$C_{qi} = \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{m=1}^{n_2} Q_{qijm} \times D_{qijm} \times R_{qijm} \quad (3)$$

式中:  $Q_{qijm}$  为材料运输阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $m$  种材料的消耗量;  $D_{qijm}$  为材料运输阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $m$  种材料的运输距离;  $R_{qijm}$  为材料运输阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $m$  种材料单位运量单位运距的碳排放。

#### 3) 场外加工阶段

场外加工阶段的碳排放为拌和站(楼)拌和混合料所用机械、混合料或其他材料从拌和站(楼)或加工地点运送至施工现场所用运输车辆两个部分产生的碳排放,用到的车辆、机械主要有自卸汽车、混凝土搅拌站、混凝土运输车等,其计算公式见式(4)。

$$C_{si} = \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{h=1}^{n_3} (Q_{sijh} \times P_{sijh} \times f_{sijh}) + \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{t=1}^{n_4} (T_{sijt} \times D_{sijt} \times R_{sijt}) \quad (4)$$

式中:  $T_{sijt}$  为场外加工阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $t$  种施工机械的工作时间;  $P_{sijh}$  为场外加工阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $h$  种施工机械单位工作时间的能源消耗量;  $f_{sijh}$  为场外加工阶段第  $i$  分部工程第  $j$  分项工程第  $h$  种施工机械消耗能源的碳排放因子;  $h$  为机械种类,  $h=1, 2, \dots, n_3$ ;  $t$  为混合料种类,  $t=1, 2, \dots, n_4$ ;  $Q, D, R$  含义同式(3)。

#### 4) 现场施工阶段

现场施工阶段碳排放主要指混凝土桥建设过程中施工现场所用的各种机械产生的碳排放,用到的机械主要有回旋钻机、电弧焊机、卷扬机等,其计算公式见式(5)。

$$C_{ri} = \sum_{j=1}^{n_1} \sum_{h=1}^{n_3} (Q_{rijh} \times P_{rijh} \times f_{rijh}) \quad (5)$$

式中:  $Q, P, f, h$  含义同式(4)。

## 1.2 碳排放解释要素选取及相关性分析

### 1.2.1 解释要素选取

在桥梁设计过程中,需要考虑桥梁类型、材料选用、所处地理环境、施工方法等要素,影响因素复杂。考虑到不同施工方法对碳排放的影响不同<sup>[19]</sup>,对混凝土桥建设期碳排放的研究基于统一的预制安装施工方法,以排除施工方法对研究结论准确性的影响。

主要选取桥梁长度、材料总重量、机械工作时间等关键要素,设计水位、设计流速、设计流量等设计要素,地貌及地面高程相对高差等环境要素(地面高程相对高差用于体现地势对碳排放的影响),

分析各要素对混凝土桥建设期碳排放的解释程度。选取要素时主要考虑以下几点:1)既有研究发现,材料及机械消耗是桥梁建设施工过程中的直接碳排放来源<sup>[6]</sup>,且不同长度混凝土桥建设所需的材料及机械消耗量各有差异;2)混凝土桥设计中,设计水位、设计流量等会影响桥面设计高程、桥孔最小净长度的选取<sup>[20]</sup>,可能引起材料用量及机械消耗的变化,对混凝土桥建设期整体碳排放产生间接影响;3)地势地貌则与混凝土桥建设期填挖方量、施工材料运输等密切相关,会对碳排放产生一定的影响。

表 1 为选取解释碳排放要素的具体类型及来源等信息,除材料总重量、机械工作时间的数据来源于预算文件,其余要素的数据均来源于施工图设计文件。

**表 1 碳排放解释要素数据类型及来源**  
**Table 1 Types and sources of carbon emission explanatory factor data**

解释要素	数据类型	来源
桥梁长度	定量	施工图设计文件
设计水位	定量	施工图设计文件
设计流速	定量	施工图设计文件
设计流量	定量	施工图设计文件
材料总重量	定量	预算文件
机械工作时间	定量	预算文件
地貌	定性	施工图设计文件
地面高程、相对高差	定量	施工图设计文件

1.2.2 相关性分析方法

相关性分析主要用于识别解释碳排放的关键要素,通过计算不同要素与碳排放之间的相关系数来体现。常用的方法有简单相关分析、偏相关分析、距离相关分析 3 类。简单相关分析又分为 Pearson 相关系数、Kendall 相关系数、Spearman 相关系数。考虑到研究数据有序且不满足正态分布,选择 Spearman 相关系数来分析不同要素对碳排放的

影响程度,Spearman 相关系数通过两个变量之间的秩次大小进行计算,相关系数的绝对值越接近 1,表明两个变量之间的线性关系越明显。其计算公式见式(6)。

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{m(m^2 - 1)}, i = 1, 2 \quad (6)$$

式中: $d_i = x_i - y_i$ ,  $x_i$ 、 $y_i$  为两个变量按大小(或优劣)排序的秩; $m$  为样本容量

1.3 基于解释要素共线性的碳排放测算模型

由于解释要素之间存在量纲不一致的问题,为了消除量纲对数据分析和建模的影响,在进行模型的构建之前,首先采用标准化的方法对其进行无量纲化处理。其公式见式(7)。

$$x_i = \frac{x_{real,i} - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}}, i = 1, 2 \dots \quad (7)$$

式中: $x_{real,i}$  为不同要素的原始数据; $\mu_{x_i}$ 、 $\sigma_{x_i}$  为  $x_{real,i}$  的均值和标准差。

以 Spearman 相关系数较高的要素为自变量,以碳排放为因变量构建混凝土桥建设期的碳排放测算模型。模型构建中,若多个自变量要素之间存在共线性,某一自变量的变化可能会引起其他自变量的变化,难以准确区分各自变量对模型的独立影响,从而降低模型的稳定性和鲁棒性,使得模型对数据的微小变化过于敏感。选择岭回归、Lasso 回归、弹性网络回归来消除共线性对模型的影响,3 种模型均通过在损失函数中加入不同的正则化项,即对模型的权重进行约束,减少不重要特征的影响,以解决自变量数据存在的共线性问题。模型的计算公式及特点见表 2,其中弹性网络回归为岭回归与 Lasso 回归模型的结合,参数  $\alpha$  用于控制两个模型的权重,其取值在 0~1 之间,取 0 时为岭回归;取 1 时为 Lasso 回归。为了同时保留岭回归、减少模型过度拟合以及 Lasso 回归实现特征选择的优点,对两个模型之间的影响进行平衡,故将参数  $\alpha$  的取值取为 0.5。

表 2 模型介绍

Table 2 Model introduction

模型名称	控制参数	模型公式	模型特点
岭回归	惩罚系数 $\lambda$	$L_{ridge}(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n (y_i - x_i^T \hat{\beta})^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \hat{\beta}_j^2 = \ y - X\hat{\beta}\ ^2 + \lambda \ \hat{\beta}\ ^2$	通过限制模型系数的大小,有效减小共线性对模型参数的估计,并防止模型过度拟合
Lasso 回归	惩罚系数 $\lambda$	$L_{lasso}(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n (y_i - x_i^T \hat{\beta})^2 + \lambda \sum_{j=1}^m  \hat{\beta}_j $	通过惩罚系数 $\lambda$ ,将重要程度不高的自变量系数缩小为 0,解决自变量共线性问题的同时,实现特征选择和参数稀疏化
弹性网络回归	惩罚系数 $\lambda$ 权重控制 $\alpha$	$L_{ElasticNet}(\hat{\beta}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i^T \hat{\beta})^2}{2n} + \lambda \left( \frac{1-\alpha}{2} \sum_{j=1}^m \hat{\beta}_j^2 + \alpha \sum_{j=1}^m  \hat{\beta}_j  \right)$	结合了岭回归和 Lasso 回归的正则化方法

注: $L(\hat{\beta})$  为损失函数; $\lambda$  为正则化的惩罚系数; $x$  为自变量; $y$  为因变量; $n$  为自变量的个数; $m$  为需解释的数据量; $\hat{\beta} = (X^T X + \lambda I)^{-1} (X^T Y)$ 。

## 2 案例分析

### 2.1 工程概况

选取位于黄土高原东南区域的某一新建高速公路为研究主体,该高速公路采用双向四车道,设计速度为 100 km/h,设计荷载为公路-I级。公路走向近于南北向,区内地势由西北向东南倾斜,总体地貌属于黄土丘陵沟壑。

该高速公路中桥梁设计形式有钢结构桥和混凝土桥两种,考虑钢结构桥与混凝土桥碳排放差距较大<sup>[18]</sup>及样本数据量对构建模型产生的误差影响情况,选取混凝土桥作为具体研究对象,构建建设期的碳排放测算模型。所选混凝土桥中桥梁长度在 0~100 m 的共 7 座,在 100~1 000 m 的共 24 座;上部结构均为预应力混凝土预制箱梁,采用装配式结构,下部结构采用单幅双柱式墩;由于黄土高原地区土壤松软、孔隙度大,所以桩基础均选用钻孔灌注桩。31 座混凝土桥的基础信息见附录 1。

### 2.2 碳排放计算

#### 2.2.1 工程量数据

混凝土桥碳排放计算及特征分析所需的数据主要包括材料、机械的各种消耗,其中材料包含种类、用量、单位等信息,机械包含机械型号、代号、工作时间等信息,此部分数据均来源于该高速公路对应的预算文件。材料运输车辆类型及运输距离信息均来源于实际施工统计数据,不同型号机械单位时间的能耗量及能耗类型从《公路工程机械台班定额》<sup>[21]</sup>中查询获得。

#### 2.2.2 碳排放因子取值

##### 1) 主要材料碳排放因子

混凝土桥建设期主要消耗的材料有钢筋、水泥、钢绞线等,在以往的研究中,此类材料不仅消耗量大且碳排放因子较高,是计算碳排放应重点关注的内容。表 3 列出了计算时主要材料的碳排放因子取值及来源,其中热轧钢材、冷轧钢材等材料的碳排放因子来源于现有文献调研,石油沥青、碎石等材料的碳排放因子主要来源于中国生命周期数据库(CLCD 数据库<sup>[22]</sup>)。

##### 2) 主要能源碳排放因子

在混凝土桥建设中,运输车辆与施工机械主要耗能类型为柴油、电力,仅少部分机械采用重油,所用能源碳排放因子的取值及来源见表 4。重油的碳排放因子参考燃料油,柴油、重油的碳排放因子均考虑其生产阶段及燃烧阶段全生命周期的碳排放;电力取西北区域电网的碳排放因子。

表 3 主要材料 CO<sub>2</sub> 排放因子取值及来源

Table 3 Values and sources of CO<sub>2</sub> emission factors for main materials

建材类型	CO <sub>2</sub> 排放因子	单位	来源
热轧钢材	3 755	kg/t	文献[23]
冷轧钢材	4 524	kg/t	文献[23]
中小钢材	3 589	kg/t	文献[23]
型钢	4 339	kg/t	文献[23]
线材	3 551	kg/t	文献[23]
水泥(P·S 32.5)	677.68	kg/t	文献[23]
水泥(P·O 42.5)	920.028	kg/t	文献[23]
水泥(P·I 52.5)	1 041.557	kg/t	文献[23]
铁	2 500	kg/t	文献[24]
石油沥青	174.24	kg/t	CLCD 数据库
碎石	3	kg/m <sup>3</sup>	CLCD 数据库
砂砾	3.4	kg/m <sup>3</sup>	CLCD 数据库

表 4 能源 CO<sub>2</sub> 排放因子取值及来源

Table 4 Values and sources of energy CO<sub>2</sub> emission factors

能源类型	CO <sub>2</sub> 排放因子	单位	来源
重油	4.36	kg/kg	文献[25]
柴油	3.67	kg/kg	文献[25]
电	0.97	kg/(kW·h)	文献[25]

#### 2.2.3 计算结果

根据构建的碳排放计算模型,对 31 座混凝土桥建设期的碳排放进行计算。图 2 为不同长度混凝土桥的碳排放及碳排放强度(定义为单车道单公里的碳排放),得到混凝土桥平均碳排放强度为 7 347.8 t/(车道·km),但随着桥梁长度的增加,碳排放强度呈现略微下降。结合混凝土桥研究基础信息中的特征:长度在 0~200 m 的混凝土桥所呈现的地貌类型主要为石质低山地貌,其次为河谷地貌;而长度在 200~600 m 的混凝土桥所在地貌主要为“河谷地貌”(600 m 以上的混凝土桥只有一座,数据量较少,故不纳入特征分析)。上述桥梁碳排放强度随其长度的增加而下降的现象可能与地形地貌有一定的关系。主要依据为各地貌平均的碳排放强度从高到低依次是石质低山地貌、河谷地貌、黄土梁峁丘陵沟谷地貌,分别为 7 465.09 t/(车道·km)、7 312.06 t/(车道·km)、6 781.86 t/(车道·km),推测不同类型的地形地貌会对桥梁设计、施工难度等有一定程度的影响,同时反映在材料及能源消耗上,进而导致产生的碳排放有所不同。

图 3 为 31 座混凝土桥建设期各阶段的碳排放(将涉及到的混凝土桥依次编号为 1、2...31),其中材料生产阶段碳排放最高,占建设期的总碳排放 90% 以上,其余依次为场外加工、现场施工、材料运输阶段。

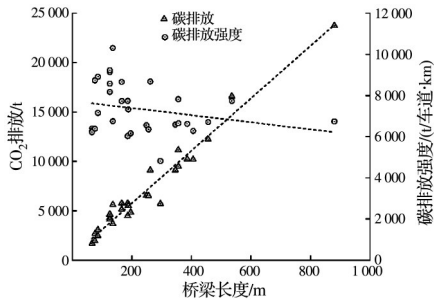


图 2 不同长度混凝土桥碳排放及碳排放强度

Fig. 2 Carbon emissions and carbon emission intensity of concrete bridges of different lengths

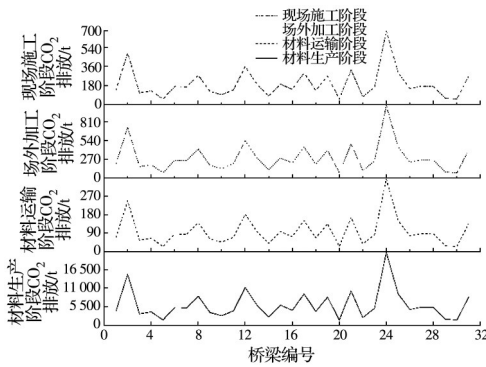


图 3 混凝土桥各阶段碳排放

Fig. 3 Carbon emissions at various stages of concrete bridges

钢材和水泥为材料生产阶段的主要碳排放来源,分别占该阶段总碳排放的47.97%、38.20%;场外加工阶段碳排放则主要来自沥青拌和站使用的工业锅炉,占该阶段的43.68%。现场施工阶段碳排放最高的机械为回旋钻机,占该阶段总碳排放的30%~40%,这主要是因为所研究地区混凝土桥地基土深处主要为中风化砂岩,其饱和抗压强度标准值在30~60 MPa之间<sup>[26]</sup>,坚硬程度为“较硬岩”,使得桩基础施工过程中需大量使用回旋钻机,产生较多的能源消耗。材料运输阶段占建设期总碳排放比例最低,但计算得到碳排放数值较高,所有混凝土桥该阶段的平均CO<sub>2</sub>排放为127.09 t,其碳排放数值并不低,这主要是因为研究地区以黄土为主,满足建设条件所需的河砂、碎石、集料等主要原材料相对稀少,需从附近省份或市域调集或购买,材料运距较大,多位于200~600 km之间。

各混凝土桥不同部位的碳排放见图4,碳排放最高的为上部构造。相比其他部位,上部结构为主要承重结构,建设时需大量钢筋满足混凝土桥承载力、刚度要求,并需要较多的混凝土用于桥面铺装、横梁制作等。各混凝土桥上部结构碳排放均达到了建设期总碳排放的50%以上,平均占比为64.8%,平均碳排放为4 414.31 t。

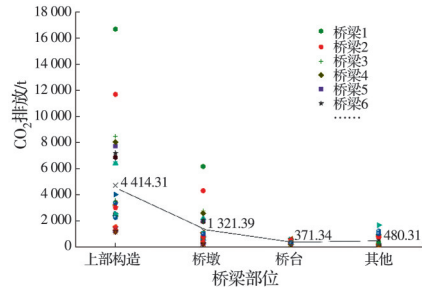


图 4 混凝土桥不同部位碳排放

Fig. 4 Carbon emissions of different parts of concrete bridges

### 2.3 相关性分析结果

利用Python计算桥梁长度( $x_1$ )、设计水位( $x_2$ )、设计流速( $x_3$ )、设计流量( $x_4$ )、材料总重量( $x_5$ )、机械工作时间( $x_6$ )、地貌( $x_7$ )、地面高程相对高差( $x_8$ )8个要素与碳排放( $y$ )之间的Spearman相关系数。在施工图设计文件中,将黄土丘陵沟壑区内沿线的地貌依次划分为:河谷地貌、石质低山地貌与黄土梁峁丘陵沟谷地貌3种类型,据此对该定性指标“地貌”依次定量化为阿拉伯数字1、2、3,便于后续的相关性分析。

图5为计算得到的碳排放解释要素Spearman相关系数热力图,即用颜色深浅代表要素之间的相关程度,其中0.8~1为极强相关,0.6~0.8为强相关,0.4~0.6为中等程度相关。从图6可以看出,对碳排放影响较大的要素依次为:桥梁长度(0.96)、材料总重量(0.88)、机械工作时间(0.82),且三者表现出较强的相关性,具有共线性。设计流速以及地面高程相对高差表现为弱相关,其他要素无明显相关性,因此,碳排放测算模型构建时对上述呈弱相关性或无相关性的要素进行剔除。

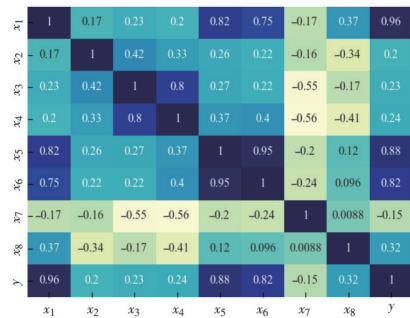


图 5 碳排放解释要素 Spearman 相关系数热力图

Fig. 5 Thermal diagram of Spearman correlation coefficient for explanatory factors of carbon emissions

由图5可知,桥梁长度、材料总重量、机械工作时间几个要素与碳排放之间的相关系数均为正,表明各要素对混凝土桥的碳排放有正向影响。随着桥梁长度的增加,材料用量、材料运输距离、机械工作时间等的增加,碳排放明显增加。

2.4 碳排放测算模型

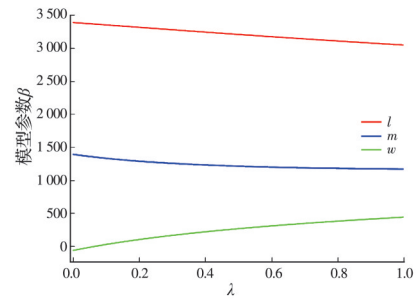
碳排放测算模型构建全过程均采用 Python 软件,根据相关性分析结果,选取桥梁长度、材料总重量、机械工作时间 3 个要素作为构建碳排放测算模型的解释变量,并对涉及的数据进行标准化处理。不同模型惩罚系数  $\lambda$  的取值采用  $K$  折交叉验证法 ( $K$ -Fold Cross-Validation) 进行确定,将数据集划分为  $K$  个大小相似的互斥子集,其中  $K-1$  个子集用作训练集,剩下的一个子集用作验证集,选择不同的验证集重复  $K$  次,将结果进行平均得到最优取值,具体结果见图 6。其中岭回归  $\lambda$  的取值为 0.254 9; Lasso 回归  $\lambda$  的取值为 33.978 6;弹性网络回归  $\lambda$  的取值为 0.024 4。

3 种模型测试集的比例均设定为 0.2,模型构建的效果选用均方根误差 RMSE (root mean square error)、决定系数  $R^2$  (coefficient of determination) 两个指标进行衡量,其中 RMSE 用于评估模型是否测算到正确的数值,  $R^2$  用于评估模型是否拟合到足够的信息。

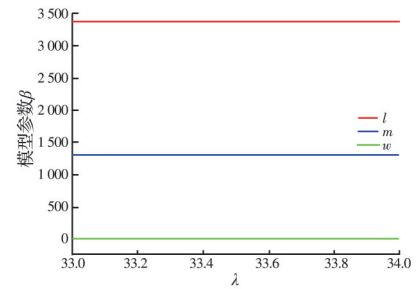
模型构建结果见表 5,从表中可以看出, Lasso 回归模型评价指标 RMSE 值最低、 $R^2$  值最高,分别为 720.096 5、0.976 2,表明相比于岭回归、弹性网络回归模型, Lasso 回归模型测算精度最高;且该模型将 3 个自变量收缩为两个,降低了模型复杂度。故选择 Lasso 回归模型拟合结果作为混凝土桥建设期碳排放测算模型,具体模型为  $y = 3\ 079.15l + 1\ 633.03m + 6\ 594.67$ 。图 7 为该模型对不同混凝土桥碳排放测算值与真实值的折线图。相对 Lasso 回归模型,岭回归和弹性网络回归模型评价指标值近似且精度较低,自变量较多,模型复杂度高。

结合表 5 与图 7 可以看出, Lasso 回归模型指标衡量以及碳排放解释效果较好,将 3 个相关性较高的碳排放解释要素压缩为桥梁长度、材料总重量,表明在混凝土桥的设计过程中应重点对桥梁长度、结构设计、材料选择等进行优化,以减少其建设期的碳排放。

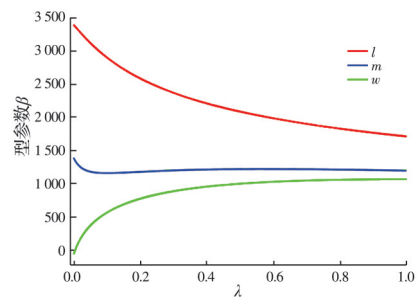
工程实践中,混凝土桥设计前期,如工程可行性研究阶段、初步测量阶段、初步勘察阶段,难以获



(a) 岭回归



(b) Lasso 回归



(c) 弹性网络回归

图 6 交叉验证确定不同模型的惩罚系数

Fig. 6 Cross-validation to determine penalty coefficients for different models

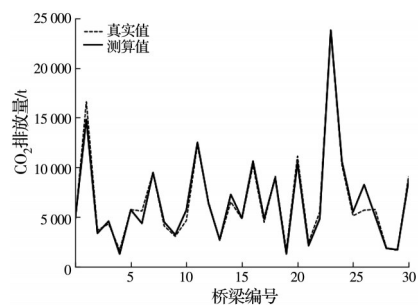


图 7 Lasso 回归碳排放解释效果图

Fig. 7 Lasso regression carbon emission interpretive effect diagram

表 5 不同模型构建结果

Table 5 Results of different model construction

模型	构建结果			评价指标		
	$l$	$m$	$w$	常数项	RMSE	$R^2$
岭回归	2 996.81	1 556.38	169.94	6 601.86	730.103 3	0.975 5
Lasso 回归	3 079.15	1 633.03		6 594.67	720.096 5	0.976 2
弹性网络回归	2 987.18	1 541.58	192.55	6 603.06	731.355 6	0.975 4

注:  $l$  为桥梁长度;  $m$  为材料总重量;  $w$  为机械工作时间。

得具体的工程量清单,根据图6相关性分析结果可知,桥梁长度与混凝土桥建设期碳排放相关性最高。故以桥梁长度为碳排放解释要素,构建线性回归模型,模型构建软件、数据、测试集比例设置及评价指标等信息均与前文相同。模型构建结果为 $y = 4\ 601.92l + 6\ 561.30$ ,其中评价指标RMSE值为912.19, $R^2$ 值为0.9618,模型测算精度劣于碳排放多解释要素测算模型,从碳排放桥梁长度单要素解释效果图(图8)可以直观看出桥梁编号为2、6、26的混凝土桥的真实值和测算值都相差较大。该模型可用于解释混凝土桥设计前期工程可行性研究阶段、初步测量阶段以及初步勘察阶段的碳排放,但对于混凝土桥建设期有具体工程量清单的阶段,整体碳排放的测算仍建议采用精度较高的多解释要素Lasso回归模型。

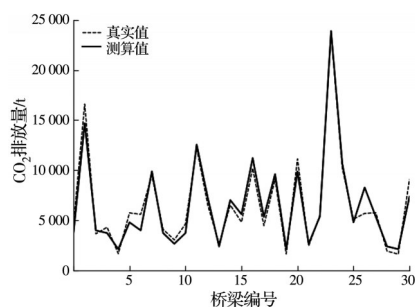


图8 碳排放单要素解释效果图

Fig. 8 Explanation effect diagram of single element for carbon emission

### 3 结论及建议

利用碳排放因子法对混凝土桥建设期的碳排放进行计算,并考虑了众多要素对碳排放测算模型的解释效果及共线性问题,结合案例确立了解释混凝土桥建设期碳排放测算精度较高的模型。得到以下主要结论:

1)对31座混凝土桥建设期的碳排放进行详细计算并分析发现,其平均碳排放强度为7 347.8 t/(车道·km),碳排放最高的部位均为上部构造,占建设期总碳排放的50%以上。

2)计算所选取碳排放解释要素与碳排放之间的Spearman相关系数,分析发现解释混凝土桥建设期碳排放的关键要素为:桥梁长度、材料总重量、机械工作时间,且3个要素之间具有明显共线性。

3)以3个关键要素为自变量,分别构建岭回归、Lasso回归、弹性网络回归模型,基于31座混凝土桥的相关数据进行训练,发现混凝土桥建设期精度最高的碳排放测算模型为Lasso回归模型,具体模型为 $y = 3\ 079.15l + 1\ 633.03m + 6\ 594.67$ 。

结合碳排放特征分析、相关性分析及测算模型,在满足一定功能需要及工程质量的要求下,可以从以下几个方面减少混凝土桥建设期产生的碳排放:1)合理优化混凝土桥上部结构布置方式,采用斜撑和斜拉索等,减少混凝土及钢筋的使用量。2)选用LC50轻质高强混凝土<sup>[27]</sup>等,其密度小、重量轻且强度高,通过减少混凝土桥自重来降低碳排放。

碳排放测算模型的构建,有助于设计人员在混凝土桥设计阶段,通过分析不同方案桥梁长度、材料选取与消耗情况,得到对建设期碳排放情况的评估,为合理选择设计方案及材料提供依据,助推混凝土桥建设绿色化。未来可从以下几个方面开展进一步研究。首先,碳排放计算的边界及范围应尽可能全面,以保证研究对象碳排放计算的结果更加准确,但本文碳排放计算的边界及范围不包括办公区和生活区所造成的碳排放,后续研究可对此部分碳排放进行补充。其次,本文基于多解释要素的碳排放测算模型仅针对混凝土桥,未来可以考虑不同类型的桥梁数据,进一步拟合碳排放测算模型,以增强模型的普适性。

### 参考文献

- [1] COLLINGS D. An environmental comparison of bridge forms [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2006, 159(4): 163-168.
- [2] 刘沐宇, 欧阳丹. 桥梁工程生命周期碳排放计算方法 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(增刊1): 125-129.  
LIU M Y, OUYANG D. Calculation method of life cycle carbon emissions on bridges [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33 (Sup 1): 125-129. (in Chinese)
- [3] 熊治华, 刘宏宇, 朱铭宇, 等. 陕南山区预应力混凝土箱梁桥碳排放分析及优化研究 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(23): 90-97.  
XIONG Z H, LIU H Y, ZHU M Y, et al. Carbon emission analysis and optimization of prestressed concrete box girder bridge in mountainous region of southern Shaanxi [J]. Construction Technology, 2023, 52(23): 90-97. (in Chinese)
- [4] 马佳星, 蒋建男, 谢含军, 等. 斜拉桥全寿命周期碳排放计算模型 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(1): 31-41.  
MA J X, JIANG J N, XIE H J, et al. Carbon emission calculation model over the life cycle of cable-stayed bridges [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57(1): 31-41. (in Chinese)
- [5] WANG H Z, LIU Y X, LI J, et al. Environmental life



- cycle assessment of bridge deck pavement and case studies of two bridges in China [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02115.
- [6] MA M J, LI Z Q, XUE K, et al. Exergy-based life cycle assessment model for evaluating the environmental impact of bridge: principle and case study [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 11804.
- [7] WANG J J, PAN K, WANG C, et al. Integrated carbon emissions and carbon costs for bridge construction projects using carbon trading and tax systems-Taking Beijing as an example [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10589.
- [8] 黄山倩, 黄学文, 高硕晗, 等. 基于 LCA 的高速公路建设全过程碳排放核算[J]. *交通运输研究*, 2022, 8(6): 72-80, 89.  
HUANG S Q, HUANG X W, GAO S H, et al. Carbon emission calculation of whole expressway construction phase based on LCA theory [J]. *Transport Research*, 2022, 8(6): 72-80, 89. (in Chinese)
- [9] WANG X W, DUAN Z Y, WU L S, et al. Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: A case study in southwest region of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 705-714.
- [10] 陈曜东, 骆妍. 高速公路建设期碳排放测算与影响因素研究[J]. *交通与运输*, 2023, 39(3): 95-98.  
CHEN Y D, LUO Y. Carbon emission calculation and influencing factors during highway construction period [J]. *Traffic & Transportation*, 2023, 39(3): 95-98. (in Chinese)
- [11] 郭春, 徐建峰, 张佳鹏. 隧道建设碳排放计算方法及预测模型[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(8): 1140-1146.  
GUO C, XU J F, ZHANG J P. Calculation methods and prediction models of carbon emission of tunnel construction [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(8): 1140-1146. (in Chinese)
- [12] LIU Y L, YUAN Y, GUAN H C, et al. Technology and threshold: An empirical study of road passenger transport emissions [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2021, 38: 100487.
- [13] CHEKOURI S M, CHIBI A, BENBOUZIANE M. Examining the driving factors of CO<sub>2</sub> emissions using the STIRPAT model: The case of Algeria [J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2020, 39(10): 927-940.
- [14] 吴启贤, 谢新艳, 陈赟, 等. 基于偏最小二乘法结构方程模型的城市轨道交通工程碳排放影响因素分析[J]. *环境工程*, 2023, 41(10): 133-140.  
WU Q X, XIE X Y, CHEN Y, et al. Analysis of factors influencing carbon emissions of urban rail transit projects based on partial least squares structural equation modeling [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(10): 133-140. (in Chinese)
- [15] 毛希凯. 建筑生命周期碳排放预测模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
MAO X K. Study on carbon emission prediction model of building life cycle [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [16] DONG J F, DENG C, LI R R, et al. Moving low-carbon transportation in Xinjiang: Evidence from STIRPAT and rigid regression models [J]. *Sustainability*, 2016, 9(1): 24.
- [17] CHEN R H, YE M H, LI Z, et al. Empirical assessment of carbon emissions in Guangdong Province within the framework of carbon peaking and carbon neutrality: A lasso-TPE-BP neural network approach [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(58): 121647-121665.
- [18] 王银辉, 蒋建男, 谢含军, 等. 桥梁工程全寿命周期碳排放流计算与分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(22): 9605-9614.  
WANG Y H, JIANG J N, XIE H J, et al. Calculation and analysis of life-cycle carbon emission flow of bridge engineering [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(22): 9605-9614. (in Chinese)
- [19] 张振浩, 谭荣平, 曾意, 等. 不同桥梁施工方案的碳排放差异分析[J]. *交通科学与工程*, 2019, 35(1): 38-43.  
ZHANG Z H, TAN R P, ZENG Y, et al. Differences of carbon emission in the construction of the box girder bridge using different construction methods [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2019, 35(1): 38-43. (in Chinese)
- [20] 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.  
Hydrological specifications for survey and design of highway engineering: JTG C30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [21] 公路工程机械台班费用定额: JTG/T 3833—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.  
Fixed cost quota for highway engineering machinery shift: JTG/T 3833—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [22] 四川大学, 亿科环境. 中国生命周期基础数据库[DB/OL]. <https://www.efootprint.net/database>.  
Sichuan University, Yike Environmental Technology. Chinese Life Cycle Database [DB/OL]. <https://www.efootprint.net/database>. (in Chinese)
- [23] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.  
GONG Z Q. Study on quantitative evaluation of physical and chemical environmental conditions in the life cycle of building materials [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [24] YAN H, SHEN Q P, FAN L C H, et al. Greenhouse

- gas emissions in building construction: A case study of one peking in Hong Kong [J]. Building and Environment, 2010, 45(4): 949-955.
- [25] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- CUI P. Study on the construction and application of carbon emission factor library in building life cycle [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [26] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts: JTG D63—2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)
- [27] 高原, 高全青, 姚庚, 等. LC50轻质高强混凝土研发及工程应用[J]. 公路, 2021, 66(6): 324-329.
- GAO Y, GAO Q Q, YAO G, et al. Study and application of LC50 lightweight high-strength concrete [J]. Highway, 2021, 66(6): 324-329. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)

## 附录 A

表 A.1 31座混凝土桥基础信息表

序号	桥型	桥梁长度/m	设计水位/m	设计流速/(m/s)	设计流量/(m <sup>3</sup> /s)	地貌类型	地面高程相对高差/m
1	中桥	66.08	1 004.14	4.7	43	石质低山地貌	23.92
2	中桥	66.08	0	0	0	石质低山地貌	19.50
3	中桥	66.08	0	0	0	黄土梁峁丘陵沟谷地貌	23.10
4	中桥	76.08	1 339.54	2.5	65	河谷地貌	2.50
5	中桥	76.08	0	0	0	黄土梁峁丘陵沟谷地貌	18.60
6	中桥	86.08	1 244.63	2.5	105	河谷地貌	2.30
7	中桥	86.08	0	0	0	石质低山地貌	21.90
8	大桥	126.08	933.15	4.2	677	石质低山地貌	18.50
9	大桥	126.08	996.34	3	637	石质低山地貌	18.40
10	大桥	126.08	1 238.77	3.9	108	河谷地貌	22.10
11	大桥	126.08	1 252.39	2.8	104	河谷地貌	4.10
12	大桥	136.08	966.44	5.8	661	石质低山地貌	14.90
13	大桥	136.08	1 099.24	3.5	550	石质低山地貌	10.40
14	大桥	166.08	1 038.52	3.3	607	石质低山地貌	29.00
15	大桥	166.08	1 148.5	3.8	194	石质低山地貌	5.80
16	大桥	186.08	1 465.02	2.4	21	石质低山地貌	20.90
17	大桥	186.08	0	0	0	黄土梁峁丘陵沟谷地貌	54.80
18	大桥	188.00	1 221.49	4.3	133	石质低山地貌	19.00
19	大桥	196.08	0	0	0	河谷地貌	2.57
20	大桥	249.12	1 356.35	3.45	62	河谷地貌	9.90
21	大桥	256.08	1 310.98	3.2	70	河谷地貌	6.69
22	大桥	262.04	0	0	0	河谷地貌	3.17
23	大桥	296.08	1 130.89	5	195	石质低山地貌	12.60
24	大桥	346.08	0	0	0	河谷地貌	2.96
25	大桥	356.08	1 249.77	3.7	122	石质低山地貌	30.00
26	大桥	356.56	1 192.74	3.05	120	石质低山地貌	24.00
27	大桥	386.08	1 149.57	4	194	河谷地貌	17.40
28	大桥	406.08	0	0	0	河谷地貌	3.70
29	大桥	456.08	1 265.7	3.5	86	河谷地貌	8.70
30	大桥	536.08	949.65	4	663	河谷地貌	28.18
31	大桥	880.12	1 213.66	4.3	134	石质低山地貌	31.40