

黄河下游干流纵向离散系数估算方法

刘震^{1,2} 孙熙³

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098;

2.河海大学水文水资源学院 江苏 南京 210098;3.河南省水利勘测设计研究有限公司 河南 郑州 450008)

摘要 利用水文监测数据,采用理论积分公式计算纵向离散系数,通过量纲和相关分析得到估算黄河下游干流纵向离散系数的一般公式形式,考虑河床变化大、河道不顺直、含沙量大等特点,根据研究河段不同的河道特征,以理论计算值作为样本数进行多元回归分析,采用分段的方式分别得到适用于黄河下游干流河段的污染物纵向离散系数的经验估算公式。结果表明,应用该经验估算公式得到的山东河段相关系数较高,河南河段估算结果不够理想。

关键词 纵向离散系数;量纲分析;多元回归分析;经验公式;黄河下游

中图分类号 TV133 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)02-0157-04

纵向离散是指天然河流中由于断面流速分布不均匀引起水中物质纵向分散的现象,纵向离散系数是体现水体这种性能的参数^[1]。作为描述天然河流混合输移特性的重要参数^[2],纵向离散系数主要受水流条件、断面特征及河道形态等因素的影响,反映了河流纵向混合特性^[3]。目前普遍使用的计算河流纵向离散系数的方法有:

a. 理论计算法。当已知河流断面流速分布资料时,通过积分计算求得纵向离散系数。用断面流速分布法计算得到的是纯水力学意义上的离散系数,对于沿程断面变化较大、平面上又是弯曲的非顺直河流需要修正。在一般河流中,由于断面流速分布与水深资料的缺乏,其适用性受到一定的限制。

b. 经验公式法。当缺乏流速分布资料时,作为粗略估算一般使用经验公式法。经验公式法的缺点是估算结果的精度不够。经验公式是根据特定的河流对象研究总结得到的,只适合于具有特定河道断面特征和流速条件的河流。黄河小浪底以下到艾山断面河道的特征是含沙量大、河道散乱、断面和宽深比变化范围很大,这些都会导致应用经验公式估算纵向离散系数的结果误差较大。

c. 现场示踪法。采用现场示踪法得到的结果是最可靠的。但在小浪底以下几百公里的河道上进行大规模的示踪试验,将耗费巨大的人力资源和示踪剂量,经济上难以承受。

1 计算方法选择

理论计算法能够可靠地反映在河宽远远大于水深的河流中,横向流速不均匀分布引起的污染物浓度离散变化,并且依据测量精度高的断面流速分布资料推算纵向离散系数,因此结论较为可靠。而在水流和河流特性条件已知的情况下,通过经验公式能够较快地计算并预测出纵向离散系数值。因此,本文采用理论计算和经验公式相结合的计算方法,利用黄河河流水文监测数据,采用纵向离散系数的理论积分计算公式来计算黄河下游干流河段的纵向离散系数值。将计算出的河段纵向离散系数值作为样本数,结合计算值、水文条件和断面特征数据资料,对计算纵向离散系数公式的一般形式进行量纲分析,分析纵向离散系数与可能组成因子之间的相关性程度,将相关性好的因子组合,假设可能的纵向离散系数经验公式,再把经验公式的一般形式转化为多元线性方程,经过回归分析拟合得到适合于黄河下游干流的、可用于预测的纵向离散系数经验估算公式。

1.1 理论计算

在天然河流中,河宽远远大于水深,横向流速不均匀分布引起的纵向离散远远大于垂向流速不均匀分布造成的影响。鉴于此,Fischer等^[4]将天然河流简化为平面二维水流,沿用Taylor等^[5-6]的分析方法,由横向流速分布推导得到天然河道中纵向离散系数 E_x 的理论计算公式:

$$E_x = - \frac{1}{A} \int_0^B q(y) dy \int_0^y \frac{1}{D_y h(y)} dy \int_0^y q(y) dy \tag{1}$$

其中

$$q(y) = h(y) (u(y) - U) \quad D_y = \alpha h(y) U_*$$

式中: A ——横断面面积; B ——断面宽度; $h(y)$ ——横坐标 y 处的水深; $q(y)$ ——横坐标 y 处的单宽流量相对于断面平均流量的偏差; D_y ——横向扩散系数; $u(y)$ ——横坐标 y 处的垂线平均流速; U ——断面平均流速; α ——系数,顺直天然河道取 0.1~0.2,弯曲河道取 0.3~0.9; U_* ——摩阻流速.

1.2 经验公式

根据 Taylor^[5]理论,纵向离散系数的一般表达式为

$$E_x = \alpha H U_* \quad \alpha = a \left(\frac{B}{H} \right)^b \left(\frac{U}{U_*} \right)^c \tag{2}$$

式中 a, b, c 为经验系数,根据不同河道特点进行率定.

纵向离散系数 E_x 与河流的宽度、水深、流速以及水力坡降等水力参数和河道参数有关,在缺乏详细的流速分布资料时,可用经验公式进行估算.由于各类经验公式是根据特定的水体得到的,所以基本上只能适用于一定特征的河流,局限性很大.几个典型的计算纵向离散系数的经验公式如下.

文献 7]:
$$E_x = 0.011 \left(\frac{B}{H} \right)^2 \left(\frac{U}{U_*} \right)^2 H U_*$$

文献 8]:
$$E_x = 5.915 \left(\frac{B}{H} \right)^{0.62} \left(\frac{U}{U_*} \right)^{1.428} H U_*$$

文献 9]:
$$E_x = 2.0 \left(\frac{B}{H} \right)^{1.5}$$

文献 10]:
$$E_x = 0.145 + \frac{1}{3520} \left(\frac{B}{H} \right)^{1.38} \frac{U}{U_*} H U_*$$

比较可见,几个经验公式的差别非常大,只能适合于各自针对的特定的水流条件.对于黄河下游干流的具体研究条件,需要推导专门用于预测纵向离散系数值的经验公式.

2 黄河下游干流概况

黄河下游干流区域属温带半湿润大陆性季风气候,四季分明.年平均气温 15℃左右,年内 1 月份最冷,平均气温 5℃左右,7 月份最热,平均气温 26℃左右.多年平均日照 1740~2310 h,多年平均蒸发量 1000~1200 mm,多年平均降水量 580~700 mm.降水多集中在 7~9 月份,且降雨量年际变化大.

黄河自小浪底水库以下河道呈现黄河独有的特征.花园口至高村河段,甚至孙口,是散乱、游荡性河道,河宽变化大,水深沿横断面分布极不均匀,河床冲淤变化迅速,属于典型的宽浅型河道.艾山至利津河段基本上是单一、规则的河道,断面面积较稳定,河道整体上呈现弯曲状态.本文将整个黄河下游河段分成河南河段、山东河段两部分.河南河段包括花园口至高村之间的游荡性河道和高村至孙口之间的过渡性河道,孙口至利津河道属于山东河段.

河南河段是游荡性河道,断面形态宽浅,河宽年际变化很大,最大水面宽可达近 10 km,最窄时只有数百米,通常水深是水面宽的数百分之一.涨水期发生冲刷,使断面面积增大.游荡性、过渡性河道由于主流处于摆动不定的状况,使水流在断面上形成横向流速梯度,加剧了横向环流的复杂性.山东河道的河势受河槽的控导,水流稳定,摆动很小,这是区别于河南河道的一个非常显著的特点.花园口和夹河滩站水位涨率最小,高村略大于花园口和夹河滩,孙口的更大,山东河道的水位涨率最大^[11].

小浪底水库以下共设置 8 个代表性的水文监测断面,依次为小浪底、花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、泺口、利津.本文模拟分析河段的范围是:上游至小浪底水文断面下游 20 km 处,下游至利津断面,全长约 750 km.监测站点分布如图 1 所示.

3 计算结果

3.1 理论计算值

由式(1)~(2)计算得出黄河下游 6 个水文站点的纵向离散系数平均值,如表 1 所示.

表 1 理论计算法结果

Table 1 The results of theoretical calculation

站点	H/m	B/m	$U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_*/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	B/H	$E_x/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
花园口	2.15	437	1.1224	0.047 650	212.476 3	665 728
夹河滩	1.84	423	1.345 4	0.045 697	242.209 9	30 240
高村	1.78	419	1.437 4	0.044 797	244.876 6	24 054
孙口	1.875	371	1.378 8	0.043 116	207.919 6	6 245
艾山	3.85	226	1.277 1	0.063 049	61.196 0	3 063
冻口	4.23	144	1.161 6	0.067 891	34.712 9	10 104

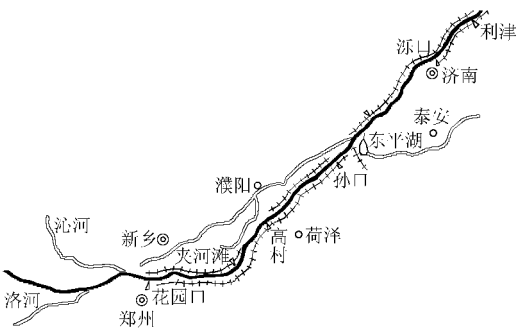


图 1 黄河下游小浪底—利津监测站点分布

Fig.1 Distribution of hydrologic stations

from Xiaolangdi to Lijin in the lower Yellow River

3.2 经验公式拟合

通过量纲和相关性分析,做出 E_x 与 HU 、 BU 、 U/U_* 、 B/H 的相关关系图,求出相关系数,结果见图 2。

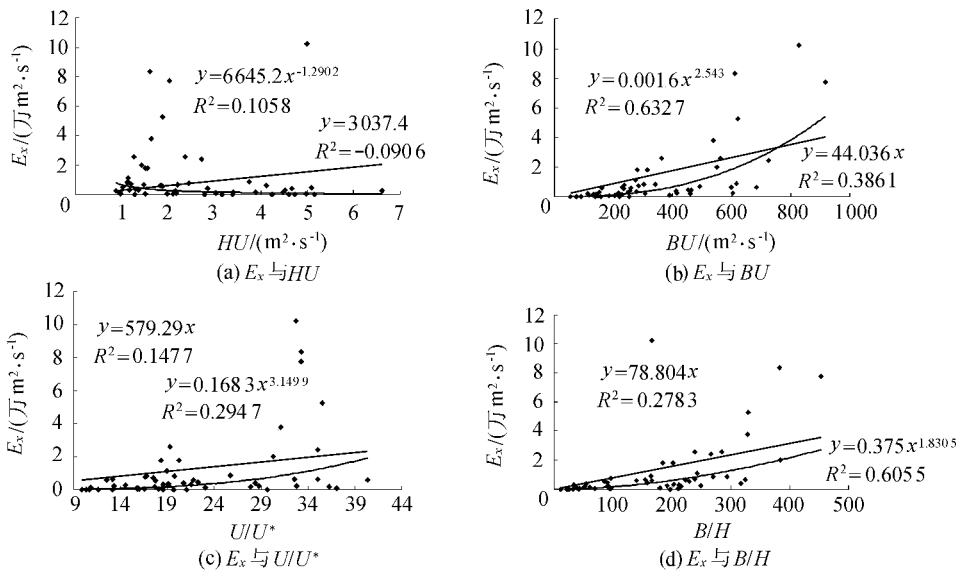


图 2 花园口—冻口 E_x 与 HU 、 BU 、 U/U_* 、 B/H 的关系曲线

Fig.2 The relation curves of E_x - HU 、 BU 、 U/U_* 、 B/H from Huayuankou to Luokou

山东河段孙口—艾山：

$$E_x = 1.344\left(\frac{B}{H}\right)^{1.803}\left(\frac{U}{U_*}\right)^{0.425}HU_* \quad R^2 = 0.76$$

(4)

$$\text{山东河段冻口以下：} \quad E_x = 0.038\left(\frac{B}{H}\right)^{2.402}\left(\frac{U}{U_*}\right)^{0.232}HU_* \quad R^2 = 0.79$$

(5)

3.3 结果分析

黄河下游小浪底至利津,长达 750 km,河道特征相差较大,纵向离散系数值变化范围也较大,不适合用统一拟合相关关系式。根据不同的河道特征,采取较长系列的实测断面和流速分布资料,以分段的方式,分别求取经验公式。各段的经验公式一般适合一定范围的断面宽深比以及低于 500 m³/s 的过水流量。

河南河段由实测水文和断面流速分布资料计算得到的纵向离散系数值幅度变化剧烈(200 ~ 3 950 000 m²/s 之间),通过估算公式计算的纵向离散系数也较大(大多处于 10³ ~ 10⁴ m²/s),与实际河段情况基本吻合。山东河段宽深比值比河南河段要小一些,不过仍然大于国内外其他河流的相应值。纵向离散系数理论值在 25 ~ 10 000 m²/s 之间,预测值大多处于 30 ~ 5 000 m²/s,与实际情况符合。

对于河南河段游荡型宽浅河道的花园口、夹河滩和高村 3 个断面,用式(3)得到的纵向离散系数预测值均在 60 000 m²/s 以下。当断面过水流量小于 500 m³/s 时,3 个断面的理论计算值与式(3)的预测值变化趋势一致,数值几乎相等,预测效果较好;当断面过水流量大于 500 m³/s 时,花园口的预测效果不是十分理想,但夹河滩和高村变化趋势一致,差值较少,预测效果较好。

对于山东孙口—冻口河段,河流宽深比较小,水流较快,拟合出的经验公式相关系数较高,纵向离散系数

由图 2 可见, E_x 与 HU 呈现负相关关系,与 B/H 呈较好的乘幂相关。从下游河道整体来看,相关关系并不理想,理论计算值的大幅度变化,与河道特征关系密切。将河南河段和山东河段 2 个河段分别考虑,经过多元回归分析,得出纵向离散系数经验公式。

河南河段花园口—高村：

$$E_x = 2.1BU \frac{U}{U_*}$$

$$R^2 = 0.46 \quad (3)$$

预测值在 $8000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下的占 99%。孙口、艾山、冻口 3 个断面,当断面过水流量小于 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,纵向离散系数实际测量计算值和公式(4)(5)的估算结果变化趋势一致,数值几乎相等,估算效果较好;当断面过水流量大于 $500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,冻口断面估算值大于实际测量计算值,艾山和孙口断面估算值小于实际测量计算值,估算效果不是十分理想。

4 结 语

天然河流的不规则性导致河流纵向离散复杂多变,这些不规则性对离散系数的影响过程目前还不清楚^[12]。通过量纲分析和多元回归分析方法,由黄河实测的水文资料计算推导出的黄河下游河道不同河段的纵向离散系数估算公式,山东河段相关系数较高,能够得出较好的估算值,河南河段的相关系数较低,估算结果不够理想。

黄河河南河段纵向离散系数值变化剧烈而频繁,体现了黄河下游特殊的水文水力特征,这主要是因为黄河下游河道宽深比值较大、含沙量大、河床冲淤严重、过水断面变化大、河道变化重现性差等因素造成的,即使采用现场示踪法来确定纵向离散系数值,也难以保证结果的长效性。如何减少这些因素的影响,使所得经验公式估算的离散系数值与相应的因子有较好的相关性,有待进一步研究探讨。

参考文献:

[1] 周克钊.纵向离散系数的经验公式及其他[J].成都科技大学学报,1988(1):72-82.
[2] 张永良,周克钊,王和平,等.天然河流的纵向离散系数[J].清华大学学报:自然科学版,1987,27(5):27-32.
[3] 李锦秀,黄真理,吕平毓.三峡库区江段纵向离散系数研究[J].水利学报,2000(8):84-87.
[4] FISCHER H B. The mechanics of dispersion in natural streams[J]. J Hydraul Div, ASCE, 1967, 93 (HY6):187-216.
[5] TAYLOR G I. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe[J]. Proc, Royal Soc, Ser A, 1954, 223:446-468.
[6] ELDER J W. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1959, 5(4):544-560.
[7] FISCHER H B, LIST E J, KOHR C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters[M]. New York:Academic Press, 1979:81-147.
[8] SEO I W, CHEONG T S. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural stream[J]. J Hydraul Eng, 1998, 124(1):25-31.
[9] IWASA Y, AYA S. Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows[C]//LEE J H W. Environmental Hydraulics. Rotterdam:Balkema A A Pub, 1991:505-510.
[10] 邓志强,褚君达.河流纵向分散系数研究[J].水科学进展,2001,12(2):137-142.
[11] 刘燕.小浪底水库运用后下游游荡性河道演变趋势研究[D].西安:西安理工大学,2004.
[12] 顾莉,华祖林.天然河流纵向离散系数确定方法的研究进展[J].水利水电科技进展,2007,27(2):85-89.

A new method for estimating the longitudinal dispersion coefficient in the main stream of the lower Yellow River

LIU Zhen^{1,2}, SUN Xi³

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Henan Water & Power Consulting Engineering Co. Ltd, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Based on hydrologic monitoring data and a theoretical integration formula, a general formula for the longitudinal dispersion coefficient in the main stream of the lower Yellow River was presented through dimensional analysis and multiple regression analysis. Using the theoretical calculation results as the sample number of the multiple regression analysis and taking the different characteristics of river sections, which is mainly caused by the riverbed variation, meandering of rivers and high sediment concentration, into account, the empirical formula for the longitudinal dispersion coefficient of pollutants in different sections was established. This formula can be applied in the establishment and application of a one-dimensional water quality model in the water quality pre-warning and prediction system for the main stream of the lower Yellow River.

Key words: longitudinal dispersion coefficient; dimensional analysis; multiple regression analysis; empirical formula; lower Yellow River