

# 基于典型气象年的游泳馆过渡季 室外空气含湿量取值方法

雷嘉翔<sup>1</sup>, 李红莲<sup>1,2</sup>, 李成旺<sup>1</sup>, 朱 同<sup>1</sup>, 程新红<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 绿色建筑国家重点实验室(XAUAT), 陕西 西安 710055;  
3. 深圳华森建筑设计工程顾问有限公司, 广东 深圳 518054)

**摘要:** 游泳馆建筑室内湿负荷大, 通风问题备受关注. 过渡季室外空气含湿量是通风量计算的基本设计参数, 含湿量的取值直接影响了建筑设计的合理性. 我国目前使用最广泛的确定过渡季室外计算含湿量的方法是通风曲线法(Ventilation-Curve Method, V-C Method). 然而, 使用该方法确定的过渡季室外空气含湿量值无法反映不保证小时数, 其取值合理性难以评估. 提出了一个新的游泳馆过渡季室外空气含湿量取值方法, 即典型过渡季法(Typical Transition Season Method, TTS Method). TTS法基于典型气象年(Typical Meteorological Year, TMY)数据挑选过渡季, 并以多种不保证小时数计算出室外空气含湿量值, 可以很好地表征当地常年气候特征, 且能够清楚地反映不保证小时数. 研究中选取中国 6 个典型代表城市, 通过计算通风量和换气次数对所选含湿量进行了评估, 验证了新方法的合理性. 结果表明, TTS法得到的含湿量计算出的通风量更符合设计要求.

**关键词:** 最小通风量, 典型气象年, 典型过渡季法, 不保证小时数

中图分类号: TU 245.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0276-07

## A method for determining outdoor air humidity ratio in natatorium during transition season based on typical meteorological years

LEI Jiexiang<sup>1</sup>, LI Honglian<sup>1,2</sup>, LI Chengwang<sup>1</sup>, ZHU Tong<sup>1</sup>, CHENG Xinhong<sup>3</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building, XAUAT, Xi'an 710055, China;

3. Shenzhen Huasen Architectural Design and Engineering Consultant Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518054, China).

**Abstract:** The natatorium's ventilation problem receives much concern because of its large wet load. The outdoor humidity ratio in transition season is the basic design parameter of ventilation calculation, directly affecting the rationality of architectural design. At present, Ventilation-Curve (V-C) method is the most widely used method to determine outdoor humidity ratio in transition season in China. However, due to failure to reflecting hours, the rationality of this value is difficult to assess by employing this approach. This paper presents a new method, Typical Transition Season (TTS) method, for determining outdoor humidity ratio in transition season of natatorium. The TTS method selects the transition season based on the Typical Meteorological Year (TMY) data, and calculates the outdoor humidity ratio with multiple non-guaranteed hours. This can well represent the local perennial climate characteristics and clearly reflect the non-guaranteed hours. In this study, through selecting six typical representative cities in China, the evaluation of the outdoor humidity ratio is achieved through calculating ventilation volume and air changes rate, verifying the rationality of this method. The results show that the ventilation rate, calculated by the humidity ratio obtained from the TTS method, is more suitable for the design requirements.

**Key words:** minimum ventilation rate; typical meteorological year; typical transition season method; non-guaranteed hour

收稿日期: 2022-11-21 修回日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278124)

第一作者: 雷嘉翔(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为建筑节能、建筑室外气象参数. E-mail: 1056654697@qq.com

通信作者: 李红莲(1980—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为建筑节能、典型气象年. E-mail: lihonglian\_lhl@163.com

随着我国体育事业的发展以及人们对于文娱生活追求的提高,游泳馆建筑数量不断扩增,不同类型游泳馆暖通空调设计也在逐步发展与完善<sup>[1-2]</sup>。

游泳馆建筑不同于一般民用建筑,馆内水面积大、湿度高,导致围护结构容易结露、泳池容易腐蚀,游泳者若长时间处于高湿环境下,会出现胸闷、呼吸困难等不良反应<sup>[3]</sup>。Lebon M<sup>[4]</sup>用三个指标对加拿大某公共游泳馆的通风工况进行了现场测量和数值分析,得出室内游泳池热湿不舒适环境是普遍存在的。Ciuman P<sup>[5]</sup>对波兰南部某学校的室内游泳池进行了通风系统的相关研究,认为降低通风率虽然可以降低能耗,但会恶化建筑内部的热湿条件。根据《暖通空调》所述<sup>[6]</sup>,游泳馆建筑对室内热湿环境有着严格的设计要求:温度为25~28℃,相对湿度≤75%。同时,游泳馆内的空气环境也更为复杂<sup>[7]</sup>:游泳池水需要消毒杀菌,导致池水及馆内空气中会有残留的化学混合物,长时间接触会对人体健康造成危害<sup>[8]</sup>。通风是改善室内空气质量(Indoor Air Quality, IAQ)的有效途径,建筑的通风率直接影响IAQ,在建筑设计中是必不可少的技术指标<sup>[9-11]</sup>。因此,为保证IAQ达标,确定合适的最小通风量具有重要意义。

通风量的计算与室内外含湿量差值相关<sup>[12]</sup>。在夏季,我国大部分城市的室外空气含湿量高于室内含湿量,无法进行通风除湿;在冬季,室外空气含湿量远低于室内空气含湿量,除湿所需通风量很小。因此,上述两种情况均无参考价值。而在过渡季,室内外含湿量的差值相近,导致除湿对通风量的要求较高,因此游泳馆通风设计中,最小通风量应在过渡季中计算并确定<sup>[6]</sup>。

通常,最小通风量计算不准确的主要原因之一是没有选取合适的室内外含湿量。对于室内含湿量,可以根据室内设计温度、湿度和当地大气压计算得出。对于室外空气含湿量,国内外均有按“不保证”的统计方法来确定<sup>[13-15]</sup>,其确定结果多用于夏季空气调节设计。然而过渡季的室外计算含湿量,各国标准并没有明确规定其确定方法。针对该问题,湖南省建筑设计院以室内可以开窗进行自然通风作为边界条件提出了通风曲线法(Ventilation-Curve Method, V-C Method)来确定游泳馆过渡季室外空气含湿量<sup>[16]</sup>,并用于游泳馆最小通风量的计算。然而,用V-C法确定的含湿量无法反映不保证小时数。对此,张铁辉<sup>[17]</sup>进行了一项考虑了不保证率的研究:提出采用气候统

计法和典型年气象数据法来获得室外计算含湿量。结果表明用该方法获取的含湿量计算通风量并进行设备选型,在实际运行中取得了良好的效果。此外,文献<sup>[18]</sup>对海南地区某游泳馆按每年不保证小时数的方法来确定过渡季室外空气含湿量,结果表明该方法挑选的过渡季含湿量过高,无法进行通风除湿。因此,只有确定合适的游泳馆室外空气含湿量值,才能保证计算出的最小通风量具有参考价值。

随着对不同类型不同用途的建筑设计精细化需求,游泳馆的通风除湿计算参数愈发被重视,而现有的方法没有全面地考虑室外空气含湿量的保证率及除湿能力的适用性。鉴于此,本文以参与并完成《游泳馆供热通风与空气调节设计标准》为基础,提出了一种能够反映不保证率的游泳馆过渡季室外空气含湿量确定方法,并与现行的V-C法进行了对比。经过最小通风量的计算验证,该方法具有良好的参考价值。

## 1 典型过渡季法的提出

### 1.1 数据来源

参考规范<sup>[19]</sup>选取了我国6个气候差异明显的代表城市的典型气象年(Typical Meteorological Year, TMY)数据及2008—2017年历年逐时数据进行研究,分别为哈尔滨、乌鲁木齐、北京、武汉、广州、昆明。数据来自“十三五”国家重点研发计划课题“建筑能耗模拟气象年”。该课题完成的我国1 019个台站的典型气象年,是目前统计年限最新、覆盖面最全的室外节能设计计算参数。

### 1.2 通风曲线法

目前国内游泳馆在设计时,一般采用V-C法来确定过渡季室外计算含湿量。方法原理如图1所示,该方法将当地室外近10年各月14:00的平均温湿度在焓湿图上连成气象曲线,气象曲线与室内空气露点温度的温度线相交点所对应的 $d$ 值即为过渡季室外计算含湿量的取值<sup>[20]</sup>。其中,A点为室内空气状态点,B点为过渡季1(即升温过渡季)室外空气状态设计点,C点为过渡季2(即降温过渡季)室外空气状态设计点。

### 1.3 典型过渡季法

气象变化是多样的,若以具体温度限值的方法确定历年每年的过渡季时间段,所得过渡季起始日期及时间长度是变化的,计算量大且难以统一。为保证过渡季数据既具有真实性,又能反映当地气候的长期平均状态,本文提出了典型过渡

季法 (Typical Transition Season Method, TTS Method), 一种结合游泳馆设计需求和气候变化特征的利用逐时热湿气象参数确定过渡季室外空气含湿量的方法. 技术路线如图 2 所示.

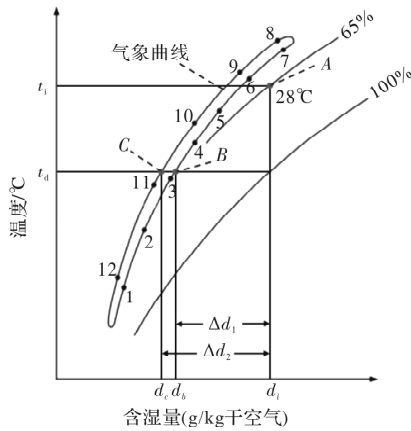


图 1 通风曲线法

Fig. 1 Principle diagram of ventilation-curve method.

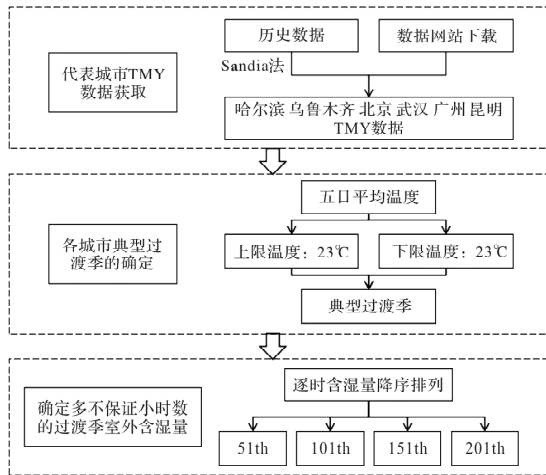


图 2 典型过渡季法技术路线

Fig. 2 Technical route of TTS method.

### 1.3.1 过渡季确定

采用五日滑动平均法<sup>[21]</sup>确定过渡季范围, 该方法计算稳定通过某界限温度的起始日期步骤如下(假设界限温度为 5℃, 见图 3(a)).

在升温季节里, 找出日平均温度第一次出现  $\geq 5^\circ\text{C}$  的日期, 按日序依次计算出五日滑动平均温度. 从一年中最长的一段大于该界限温度的五日滑动平均温度序列中, 选取第一个  $\geq 5^\circ\text{C}$  的五日滑动平均温度. 从组成该五日滑动平均温度的五天中, 选取第一个日平均温度  $\geq 5^\circ\text{C}$  的日期.

计算稳定通过某界限温度的终止日期步骤如下(假设界限温度为 5℃, 见图 3(b)).

在降温季节里, 找出日平均温度第一次出现  $< 5^\circ\text{C}$  的日期, 按日序依次计算出五日滑动平均温

度, 直到出现第一个五日滑动平均温度  $< 5^\circ\text{C}$  的日期. 选取最后一个  $\geq 5^\circ\text{C}$  的五日滑动平均温度, 从组成该五日滑动平均温度的五天中, 选取最后一个日平均温度  $\geq 5^\circ\text{C}$  的日期.

Date	Average temperature (°C)	Time interval	5-day average temperature (°C)	Date	Average temperature (°C)	Time interval	5-day average temperature (°C)
<3/3	<5.0		<5.0	<6/11	>5.0		>5.0
3/3	2.6	3/3-7/3	4.0	6/11	7.6	6/11-10/11	7.2
4/3	2.1	4/3-8/3	4.6	7/11	7.6	7/11-11/11	6.8
5/3	5.2	5/3-9/3	5.3	8/11	7	8/11-12/11	6.5
6/3	4.7	6/3-10/3	5.2	9/11	8.7	9/11-13/11	6.5
7/3	5.9	7/3-11/3	4.9	10/11	4.9	10/11-14/11	6.2
8/3	5.4	8/3-11/3	4.6	11/11	5.6	11/11-15/11	6.5
9/3	5.5	9/3-13/3	3.7	12/11	6.4	12/11-16/11	7.2
10/3	4.4	10/3-14/3	3.6	13/11	6.9	13/11-17/11	7.4
11/3	3.1	11/3-15/3	3.8	14/11	7.1	14/11-18/11	7.3
12/3	4.4	12/3-16/3	4.6	15/11	6.7	15/11-19/11	7.1
13/3	1.2	13/3-17/3	5.2	16/11	8.9	16/11-20/11	6.8
14/3	5.1	14/3-18/3	6.7	17/11	7.5	17/11-21/11	6.0
15/3	5.5	15/3-19/3	8.0	18/11	6.1	18/11-22/11	4.6
16/3	6.8	16/3-20/3		19/11	6.1	19/11-23/11	3.7
17/3	7.3			20/11	5.4	20/11-24/11	2.8
18/3	8.6			21/11	4.9		
19/3	11.9			22/11	0.7		
>19/3	>5.0			>22/11			

(a) 起始日期

(b) 终止日期

图 3 五日滑动平均法

Fig. 3 Process of five-day moving average method.

对于不同使用功能的建筑, 过渡季的设计要求不同. 考虑游泳馆建筑的设计需求, 采用五日滑动平均法时, 首先应确定合适的温度限值. 我国《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》将 5℃ 定为民用建筑供暖室外临界温, 对夏季空调工况临界温度暂未有明确定义<sup>[14]</sup>. 计算游泳馆的最小通风量所取的室外计算含湿量值通常出现在过渡季中偏高温的范围. 因此在确定过渡季范围时, 下限温度参考我国规范中供暖室外临界温度, 取 5℃ 作为温度下限. 上限温度的确定则是基于游泳馆建筑一般将温度 28℃、相对湿度 65% 作为游泳馆室内空气状态点用于设计计算, 此时风机送风温度不宜超过 28℃. 因此, 需找出日最高温度在 28℃ 左右的日期.

以 6 个代表城市的历年数据为依据, 分别统计出满足日均温度在  $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、 $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$  范围的天数, 共三组, 每组 1 000 个初始样本. 基于蒙特卡洛法从 1 000 个样本中随机抽取 100 个, 统计 100 d 中逐时温度大于 28℃ 的小时数及其占比, 统计结果如图 4 所示. 其中, 日均温度为  $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$  的天中存在 276 个大于 28℃ 的小时数, 占比达到 11.5%, 此时会造成游泳馆内过热; 日均温度为  $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$  的天中存在 86 个大于 28℃ 的小时数, 仅占样本总数的 3.6%, 此温度过于保守, 降低了可通风的小时数, 造成能源浪费; 日均温度为  $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$  的天中存在 168 个大于 28℃ 的小时数, 占比为 7%, 考虑建筑设计时适当的不保证小时数, 即可满足大部分时间的室内人体热

舒适度要求, 又能极大程度节省能耗. 因此, 选取 23 ℃ 作为确定过渡季的上限温度.

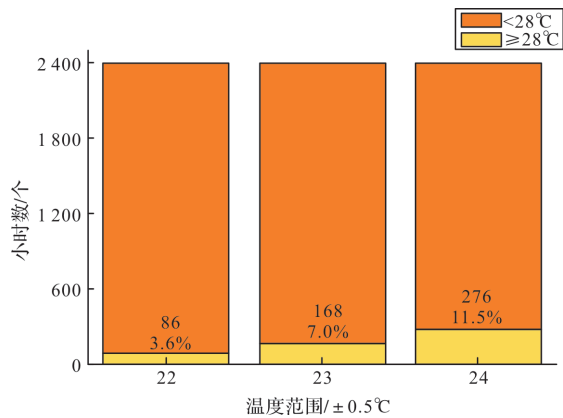


图 4 逐时温度大于 28 ℃ 的小时数及占比

Fig. 4 Hours and proportion of hourly temperature greater than 28 ℃

1.3.2 含湿量确定

国际上通常采用多不保证率室外气象设计参数<sup>[13,22]</sup>, 而我国目前采用的是单一不保证小时数. 多不保证率方便设计者根据实际工程需要选择合适的参数设计值. 考虑到经济因素, 实际工程中会取适当不保证小时数下的设计参数, 即在该工况中允许有少量时间是不满足室内设计要求的, 可有效地节约能源. 然而不保证小时数不宜过多, 一般不应超过 200 h. 结合国内外设计参数确定方法, 本文以多不保证小时数的方式确定过渡季室外空气含湿量值. 具体方法如下:

假设所选过渡季时间范围内共有  $n$  个逐时含湿量值, 则有集合  $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 将集合中所有子集按数值大小排列, 使得  $a_{n+1} \leq a_n$ , 形成数列  $A_n$ , 在数列中选取  $a_{51}$ 、 $a_{101}$ 、 $a_{151}$ 、 $a_{201}$  作为参数挑选结果, 挑选出不保证 50、100、150 和 200 h 四种不保证小时数下的室外计算含湿量.

表 2 各城市室内外含湿量计算结果

Tab. 2 Calculation results of indoor and outdoor humidity ratio in each city

城市	室外空气含湿量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (过渡季 1)				室外空气含湿量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (过渡季 2)				室内含湿量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (室内空气状态 28 ℃, 65%)
	不保证	不保证	不保证	不保证	不保证	不保证	不保证	不保证	
	50 h	100 h	150 h	200 h	50 h	100 h	150 h	200 h	
哈尔滨	10.72	10.05	9.55	8.98	11.89	11.13	10.82	10.47	16.95
乌鲁木齐	7.79	7.13	6.71	6.42	7.00	6.41	5.98	5.71	18.57
北京	9.71	8.64	8.28	7.77	13.52	12.34	11.24	10.38	16.76
武汉	13.78	12.98	12.30	11.72	13.66	13.33	12.85	12.53	16.71
广州	15.24	14.68	14.23	13.93	16.14	14.13	12.70	12.16	16.78
昆明	16.73	16.20	15.93	15.64	16.61	16.33	16.12	15.98	21.45

2.2 通风曲线法结果

基于 2008—2017 年历年的逐时数据, 应用

2 结果与对比

2.1 典型过渡季法结果

首先采用五日滑动平均法针对六个代表城市的 TMY 数据进行典型过渡季的挑选, 并计算出过渡季期间满足干球温度在 24~28 ℃ 之间、室外空气含湿量小于室内含湿 1 g/kg 以上的小时数, 记为 100% 通风小时数. 即无需加热或冷却, 可以直接进行新风除湿的小时数. 100% 通风小时数越多, 则表明该地区通风除湿的节能潜力越大. 六个代表城市挑选出的典型过渡季及 100% 通风小时数如表 1 所示. 各城市均存在大量 100% 通风小时数, 能够有效减小处理新风所造成的能耗.

表 1 代表城市典型过渡季选取

Tab. 1 Typical transition season of representative cities

代表城市	过渡季 1	过渡季 2	100% 通风 小时数/h
哈尔滨	04-12~06-13	08-19~10-23	163
乌鲁木齐	04-18~06-07	09-04~10-24	110
北京	03-11~05-18	09-17~11-13	172
武汉	02-27~05-06	09-22~11-30	161
广州	01-25~04-08	11-16~01-24	164
昆明	12-03~07-09	07-10~11-30	511

得到典型过渡季后, 分别计算各城市过渡季 1 和过渡季 2 不保证 50、100、150、200 h 的过渡季室外计算含湿量, 并结合当地大气压计算该地区游泳馆室内设计含湿量, 计算结果如表 2 所示. 在满足工程需要的保证率基础上, TTS 法计算出的过渡季室外空气含湿量, 除广州过渡季 2 不保证 50 h 含湿量外, 均比该地区游泳馆室内含湿量低 1 g/kg 以上, 满足通风除湿要求.

V-C 法对六个代表城市进行过渡季室外计算含湿量的选取, 并计算所得含湿量在该城市典型过渡季

中对应的不保证小时数。计算结果如表3所示。

表3 通风曲线法所得过渡季室外空气含湿量不保证小时数

Tab. 3 Non-guaranteed hours of outdoor humidity ratio in transition season obtained by V-C method

城市	过渡季 1		过渡季 2	
	室外计算	不保证	室外计算	不保证
	含湿量 /g · kg <sup>-1</sup>	小时数 /h	含湿量 /g · kg <sup>-1</sup>	小时数 /h
哈尔滨	8.0	312	9.0	431
乌鲁木齐	6.4	202	6.4	104
北京	5.2	507	8.0	266
武汉	10.4	354	10.4	531
广州	12.3	447	9.9	278
昆明	9.0	1821	14.0	1100

V-C法得到的过渡季室外计算含湿量,其不保证小时数几乎均大于200 h。若以此值计算最小通风量,则存在过多馆内通风量不达标的时间,不能较好的满足游泳场馆运营需求。因此,在工程上将V-C法作为确定过渡季室外计算含湿量的方法并不理想。

### 2.3 对比

各城市游泳馆设计状态下的室内含湿量及不同方法计算的室外空气含湿量,如图5所示。

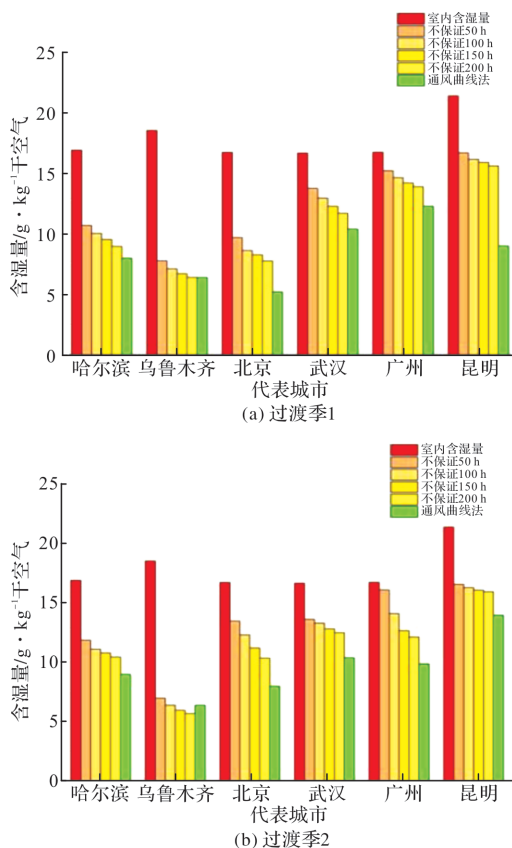


图5 室内外计算含湿量值

Fig. 5 Calculation of indoor and outdoor humidity ratio

所得室外空气含湿量与室内含湿量差值均在1 g/kg以上,表明两种方法均有很好的除湿能力。然而V-C法所得含湿量比TTS法所得不保证200 h含湿量还低2 g/kg左右,最大差值达6.64 g/kg。若将V-C法得到的含湿量用于最小通风量的计算,则将导致有很长一段时间里新风量严重不足,达不到消除室内余湿的效果。

## 3 计算校核

### 3.1 计算原理

确定了过渡季室外计算含湿量后,还需结合工程实际对游泳馆通风量及换气次数进行校核,检验所得换气次数是否满足游泳馆最低换气次数要求。若达不到设计要求,则取设计要求的最小换气次数值进行设计。游泳馆功能不同,对换气次数的要求也不同。不同类型游泳馆对换气次数的要求见表4。

表4 不同类型游泳馆换气次数

Tab. 4 Air changes rate of different types of natatoriums

游泳馆类型	比赛性	训练性	娱乐性	治疗性
换气次数(次/h)	1~4	3~6	4~8	4~8

游泳馆换气次数计算公式:

$$n = L/V \quad (1)$$

式中:  $n$  为游泳馆换气次数, 次/h;  $L$  为消除余湿所需的通风量, m<sup>3</sup>/h;  $V$  为池区体积, m<sup>3</sup>。

游泳馆池区通风量需同时满足人员最小新风量、空气氯含量达标、消除室内余湿。为达到以上目的,需要分别计算通风量,选取其中的最大值。一般用于除湿的通风量最大,其他两项可待进一步校核。

游泳馆通风量计算公式:

$$L = \frac{1000W}{\rho(d_i - d_o)} \quad (2)$$

式中:  $W$  为池区散湿量, kg/h;  $d_i$  为室内空气含湿量, g/kg; 为室外空气含湿量, g/kg;  $d_o$  为标准空气密度, kg/m<sup>3</sup>,  $\rho$  可取1.2。

由式(2)可以看出,计算通风量还需计算游泳馆池区的散湿量。游泳馆室内散湿源分别为池水、池边湿地及馆内人员。

池区散湿量计算公式为

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (3)$$

式中:  $W_1$  为池水散湿量, kg/h;  $W_2$  为池边散湿量, kg/h;  $W_3$  为人员散湿量, kg/h;

池水散湿量计算公式为

$$W_1 = 3.6AF_a(89 + 78.2v)(p_w - p_a)/\gamma \quad (4)$$



式中:  $A$  为泳池面积,  $\text{m}^2$ ;  $F_a$  为活动系数<sup>[23]</sup>, 其取值见表 5;  $v$  为泳池水面风速,  $\text{m/s}$ ;  $p_w$  为设计状态下池水温度对应的饱和水蒸气分压力,  $\text{Pa}$ ;  $P_a$  为设计状态下室内空气的水蒸气分压力,  $\text{Pa}$ ;  $\gamma$  为池水表面温度下水的汽化潜热, 可按  $\gamma=2\,500-2.35t_s$  计算, 其中  $t_s$  为泳池设计水面温度,  $\text{kJ/kg}$ .

表 5 不同类型游泳池典型活动系数

Tab. 5 Typical activity factor of different types of pool

泳池类型	家用泳池	治疗性泳池	宾馆泳池	公共泳池、学校泳池	造波泳池
典型活动系数	0.5	0.65	0.8	1	1.5

池边散湿量计算公式为

$$W_2 = 0.017\,1(t - t^*)Fn \quad (5)$$

式中:  $t$  为室内空调计算干球温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t^*$  为室内空调计算湿球温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $F$  池边面积,  $\text{m}^2$ ;  $n$  为润湿系数, 取 0.2~0.4 为宜.

人员散湿量计算公式为

$$W_3 = \omega n n_1 \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为单位人员散湿量, 取 0.123  $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{人})$ ;  $n$  为人数;  $n_1$  为群集系数, 取 0.92.

3.2 模型验证

本文参考西安某比赛性游泳馆的建筑信息及设计参数, 建立用于通风量计算的游泳馆模型. 该游泳馆模型建筑信息及室内基本设计参数表 6.

表 6 游泳馆基本设计参数

Tab. 6 Basic design parameters of natatorium

	参数	数值
建筑信息	池面面积/ $\text{m}^2$	1 250
	池边面积 $\text{m}^2$	1 150
	池边湿地面积/ $\text{m}^2$	316
	池厅高度/ $\text{m}$	15
室内设计参数	室内计算干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	28
	室内计算湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$	22.74
	相对湿度/ $^{\circ}\text{C}$	65%
	池水温度/ $^{\circ}\text{C}$	26
	池水表面空气流速/ $^{\circ}\text{C}$	0.2
	池边湿润系数/ $^{\circ}\text{C}$	0.2
	人员密度/ $^{\circ}\text{C}$	10

注: 池边湿地面积取泳池外扩 2 m 的面积.

依据该模型分别计算稀释氯气、人员活动以及除去余湿所需新风量, 取三者中的最大值. 参考 ASHRAE 通风标准<sup>[24]</sup>, 降低氯气浓度的通风量按每平方米泳池及池边湿地面积 8.78  $\text{m}^3/\text{h}$  计算, 泳池及池边湿地面积为 1 566  $\text{m}^2$ , 因此所需新风量为 13 749.48  $\text{m}^3/\text{h}$ ; 人员最小新风量按人均 30  $\text{m}^3/\text{h}$  计算, 已知游泳馆面积为 2 400  $\text{m}^2$ , 人员密

度为 10  $\text{m}^2/\text{人}$ , 得馆内共有 240 人, 因此人员最小新风量为 7 200  $\text{m}^3/\text{h}$ .

计算除湿所需通风量时, 需要确定唯一的过渡季室外计算含湿量. 同时考虑了除湿效果及不保证率, 分别选取了 TTS 法所得结果中最合适的含湿量, 及 V-C 法所得的两个过渡季含湿量中的较大值, 见表 7. 并基于该游泳馆模型计算了 6 个代表城市的除湿通风量及对应的换气次数, 如图 6 所示. 由于该模型为比赛性游泳馆, 换气次数应满足 1~4 次/h. 考虑设计要求, 若最小通风量对应的换气次数不达标, 则应以 1 次/h 进行设计.

表 7 各代表城市推荐过渡季室外空气含湿量( $\text{g/kg}$ )

Tab. 7 Outdoor humidity ratio recommended by representative cities in transition season, (dry air)/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

	哈尔滨	乌鲁木齐	北京	武汉	广州	昆明
TTS 法	11.89	7.79	13.52	12.30	14.13	16.33
V-C 法	9.0	6.4	8.0	10.4	12.3	14.0

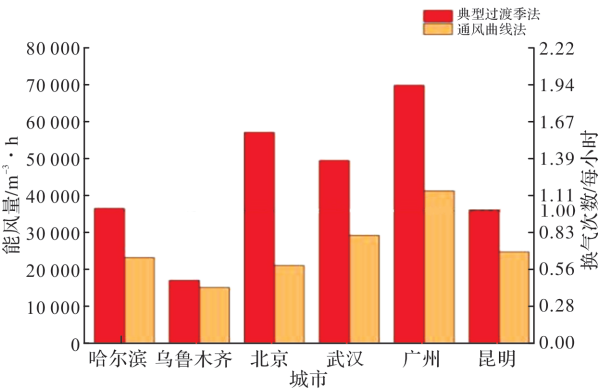


图 6 通风量及换气次数

Fig. 6 Ventilation volume and air changes rate

由计算结果可看出, 各城市除湿所需的通风量均比降低氯气浓度和人员所需最小新风量高很多, 是设计最小通风量的重要指标. 其中 V-C 法所选的过渡季室外空气含湿量在用于计算通风量及换气次数时, 虽然除湿能力高, 但是计算结果几乎均未达到设计要求的最小换气次数, 对设计最小通风量的参考性不佳. 基于 TTS 法确定的用于计算除湿通风量的含湿量, 有着不错的除湿能力的同时, 其结果也基本满足游泳馆设计的换气次数要求. 因此 TTS 法确定的过渡季室外计算含湿量有着更好地参考价值.

4 结论

现行的 V-C 法按照室内露点温度确定室外空气含湿量, 并用于计算最小通风量. 其取值适用性有待商榷. 针对这一问题, 本文提出了一种新

的确定过渡季室外计算含湿量的方法。在验证新方法的价值时,选择了中国六个代表城市进行研究。对比了TTS法与V-C法,并将挑选出的含湿量用于计算最小通风量,来验证方法优劣性。结果表明:

(1)V-C法得到的过渡季室外空气含湿量,其对应的不保证小时数过高。用该值计算所得换气次数达不到最低换气次数要求,缺乏设计参考价值;

(2)TTS法所得过渡季室外计算含湿量可反映不保证小时数,换气次数校核结果满足设计要求,用该值计算最小通风量更加准确合理;

(3)TTS法使用的是TMY数据,减少了对数据规模的需求,降低了数据获取难度。便于计算的同时还能够很好地代表当地多年气候特征。

## 参考文献 References

- [1] 王逸玮,李书宁,李岳岩. 高效绿色的全运会场馆设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4):577-583.  
WANG Yiwei, LI Shuning, LI Yueyan. Discussion on related issues in the design of efficient and green National Games stadium[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 577-583
- [2] 钱刚,计康生,谢坚,等. 天长全民健身中心体育场钢结构屋盖施工过程分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(4):617-624.  
QIAN Gang, JI Kangsheng, XIE Jian, et al. Analysis on construction process of steel structure roof of Tianchang national fitness center stadium[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(4):617-624.
- [3] PANDIAN A, RAJAMEHALA M, SINGH M, et al. Potential risks and approaches to reduce the toxicity of disinfection by-product-A review[J]. Science of the Total Environment, 2022;822.
- [4] LEBON M, FELLOUAH H, GALANIS N, et al. Numerical analysis and field measurements of the airflow patterns and thermal comfort in an indoor swimming pool: A case study[J]. Energy Efficiency, 2016;1-22.
- [5] CIUMAN P, KACZMARCZYK J. Numerical analysis of the energy consumption of ventilation processes in the school swimming pool[J]. Energies, 2021, 14(4): 1023.
- [6] 陆亚俊. 暖通空调[M]. 第3版. 北京:中国建筑工业出版社,2015:23-25.  
LU Yajun. HVAC[M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2015:23-25.
- [7] YUCE B, LI H, REZGUI Y, et al. Utilizing artificial neural network to predict energy consumption and thermal comfort level: An indoor swimming pool case study[J]. Energy & Buildings, 2014, 80:45-56.
- [8] BRAUN Joseph M, GENNINGS C, Hauser R, et al. What can epidemiological studies tell us about the impact of chemical mixtures on human health? [J]. Environmental health perspectives 2016,124 (1).
- [9] CHEN Qun. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications [J]. Building & Environment, 2009, 44(4):848-858.
- [10] PERSILY A K. Field measurement of ventilation rates [J]. Indoor Air, 2015:97-111.
- [11] YU Yanzhe, WANG Bei, YOU Shijun, et al. The effects of manual airing strategies and architectural factors on the indoor air quality in college classrooms: a case study[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2022, 15(1):1-13.
- [12] RATAJCZAK K, SZCZECHOWIAK E. Energy consumption decreasing strategy for indoor swimming pools: Decentralized ventilation system with a heat pump[J]. Energy and Buildings, 2019, 206:109574.
- [13] ASHRAE Handbook-Fundamentals 2017[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc.
- [14] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.  
China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [15] 刘晓华,江亿,张涛. 温湿度独立控制空调系统[M]. 第2版. 北京:中国建筑工业出版社,2013:273-278.  
LIU Xiaohua, JIANG Yi, ZHANG Tao. Temperature and Humidity Independent Control of Air-conditioning Systems[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2013:273-278.
- [16] 湖南省建筑设计院. 游泳馆采暖通风若干问题的探讨-测定研究小结[R]. 长沙:湖南人民出版社,1973.  
Hunan Architectural Design Institute. Discussion on heating and ventilation of natatorium-Summary of measurement research[R]. Changsha: Hunan People's Publishing House, 1973.

(下转第300页)